

38



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

## "ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL ENCAUZAMIENTO DEL RIO GUANAJUATO"

T E S I S

Que para obtener el Título de :

I N G E N I E R O C I V I L

P r e s e n t a

ALFREDO GONZALEZ SANCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:

ING. JOSE ARTURO LEON GUTIERREZ

México, D.F.

2000



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/072/98

Señor  
ALFREDO GONZALEZ SANCHEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. JOSE ARTURO LEON GUTIERREZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL

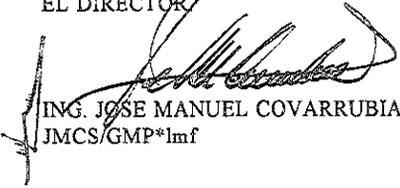
" ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL ENCAUZAMIENTO DEL RIO GUANAJUATO "

- INTRODUCCION
- I. DESCRIPCION DEL PROYECTO
  - II. EXPLORACION Y ENSAYES DE LABORATORIO
  - III. PROYECTO GEOMETRICO Y ANALISIS DE ESTABILIDAD
  - IV. PLANEACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE OBRA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria 20 de abril de 1998.  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS  
JMCS/GMP\*lmf

## **DEDICATORIA:**

- A MIS PADRES DE QUIENES HE ADMIRADO SIEMPRE SU GENEROSIDAD E INTELIGENCIA Y SU NOBLEZA DE ESPIRITU.
- A MIS TIOS: BERTHA, BENITO IGNACIO Y CELIO (†), POR SUS SABIOS CONSEJOS Y LOS GRANDES VALORES QUE HAN SEMBRADO EN MI.
- A MIS HERMANOS: EN ESPECIAL A SOLEDAD Y JOSE JAIME CON TODO CARÍÑO.
- A MI PRIMO MIGUEL ALEJANDRO, POR BRINDARME SU INCONDICIONAL APOYO Y SU AMISTAD.

## **AGRADECIMIENTOS:**

- AL INGENIERO JOSE ARTURO LEON, POR SU APOYO Y ASESORIA PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.
- QUIERO EXPRESAR MI GRATITUD A LOS INTEGRANTES DEL GRUPO ATI POR LAS FACILIDADES QUE ME BRINDARON PARA LA CULMINACION DE ESTE TRABAJO, Y MAS AUN POR SU AMISTAD.
- A MIS AMIGOS POR SU AMISTAD SINCERA .

MI MAS PROFUNDO CARIÑO Y MI  
ETERNO AGRADECIMIENTO...

ALFREDO

## INDICE

|                   |    |
|-------------------|----|
| INTRODUCCION..... | IV |
|-------------------|----|

### CAPITULO I

#### I.- DESCRIPCION DEL PROYECTO.

|  |    |
|--|----|
| I.1.- Antecedentes.....                          | 1  |
| I.2.- Medio Físico y Geográfico.....             | 2  |
| I.2.1.- Localización.....                        | 2  |
| I.2.2.- Hidrografía.....                         | 3  |
| I.2.3.- Clima.....                               | 4  |
| I.2.4.- Orografía.....                           | 4  |
| I.2.5.- Clasificación y uso de suelo.....        | 4  |
| I.2.6.- Sismicidad.....                          | 5  |
| I.2.7.- Flora y Fauna.....                       | 5  |
| I.3.- Marco Social.....                          | 6  |
| I.3.1.- Población.....                           | 6  |
| I.3.2.- Educación, Cultura y Recreación.....     | 6  |
| I.3.3.- Salud.....                               | 7  |
| I.3.4.- Vivienda.....                            | 7  |
| I.3.5.- Comunicación y Transporte.....           | 8  |
| I.3.6.- Servicios Públicos.....                  | 9  |
| I.4.- Marco Económico.....                       | 9  |
| I.4.1.- Población Económicamente Activa.....     | 9  |
| I.4.2.- Actividades Económicas.....              | 9  |
| I.5.- Origen del Proyecto.....                   | 10 |
| I.5.1.- Exposición de Motivos.....               | 10 |
| I.5.2.- Encauzamiento del Río Guznajuato.....    | 11 |
| I.5.3.- Descripción del Proyecto Geotécnico..... | 12 |

### CAPITULO II

#### II.- EXPLORACION Y ENSAYES DE LABORATORIO.

|  |    |
|--|----|
| II.1.- Generalidades.....                            | 13 |
| II.2.- Marco Geológico Regional.....                 | 15 |
| II.2.1.- Geología Regional.....                      | 15 |
| II.2.1.1.- Eje Neovolcánico.....                     | 16 |
| II.2.1.2.- Estratigrafía.....                        | 16 |
| II.2.1.3.- Subprovincia del Bajío Guanajuatense..... | 18 |
| II.2.1.4.- Suelo.....                                | 18 |
| II.2.1.5.- Geohidrología.....                        | 20 |
| II.2.1.6.- Subsistencia.....                         | 21 |
| II.3.- Inspección Directa.....                       | 23 |
| II.3.1.- Reconocimiento Superficial.....             | 23 |

|   |    |
|---|----|
| II.4.- Sondeos Exploratorios y Extracción de Muestras.....                          | 25 |
| II.4.1.- Tipos de Sondeos Realizados.....   | 25 |
| II.4.1.1.- Pozos a Cielo Abierto.....   | 25 |
| II.4.1.2.- Métodos de Penetración Estándar.....                                     | 30 |
| II.4.1.3.- Métodos con Tubo de Pared Delgada.....                                   | 34 |
| II.4.1.4.- Métodos de Sondeo Mixto.....   | 35 |
| II.5.- Determinación de Propiedades Índice y Mecánicas en Campo y Laboratorio.....  | 35 |
| II.5.1.- Descripción de las Pruebas Realizadas.....                                 | 36 |
| II.5.1.1.- Propiedades Índice.....  | 36 |
| II.5.1.2.- Propiedades Mecánicas.....   | 42 |
| II.5.2.- Designación de Ensayes Tanto en el Cauce Como en Bancos de Materiales..... | 46 |
| II.6.- Presentación de Resultados.....  | 49 |
| II.6.1.- Estratigrafía y Propiedades.....   | 49 |
| II.6.1.1.- En el Cauce.....   | 49 |
| II.6.1.2.- En Bancos de Materiales.....   | 64 |

## CAPITULO III

### III.- PROYECTO GEOMETRICO Y ANALISIS DE ESTABILIDAD

|  |    |
|--|----|
| III.1.- Estudio Hidrológico.....   | 72 |
| III.1.1.- Características Hidrológicas de la Zona en Estudio.....                | 72 |
| III.1.2.- Obtención de Gastos Máximos.....                                       | 74 |
| III.1.3.- Definición de Secciones.....   | 81 |
| III.2.- Análisis de Estabilidad de Taludes.....                                  | 84 |
| III.2.1.- Factores que Afectan la Estabilidad de Taludes.....                    | 84 |
| III.2.2.- Evaluación de Estabilidad de Taludes.....                              | 86 |
| III.2.3.- Condiciones de los Análisis de Estabilidad y Resistencia al Corte..... | 86 |
| III.2.4.- Tipos de Análisis.....   | 88 |
| III.2.5.- Métodos de Análisis de Estabilidad Prácticos.....                      | 91 |
| III.2.6.- Aplicación del Método Sueco.....                                       | 92 |
| III.2.6.1.- Localización del Círculo Crítico.....                                | 93 |
| III.2.6.2.- Metodología de Cálculo.....  | 94 |
| III.3.- Terraplenes.....   | 96 |

## CAPITULO IV

### III.- PLANEACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE OBRA

|   |     |
|---|-----|
| IV.1.- Planeación.....                      | 97  |
| IV.1.1.- Lista de Actividades.....          | 99  |
| III.1.2.- Tabla de Secuencias.....          | 99  |
| III.1.3.- Dibujo de diagrama.....           | 100 |
| IV.2.- Programación.....                    | 100 |
| IV.2.1.- Disposiciones.....                 | 101 |
| IV.2.2.- Valuación de Tiempos.....          | 101 |
| IV.2.3.- Tabla de Holguras.....             | 102 |
| IV.2.4.- Análisis y Reducciones.....        | 102 |
| IV.2.5.- Programas de Protección Civil..... | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| IV.3.- Construcción.....                             | 104 |
| IV.4.- Control de Obra.....                          | 104 |
| IV.4.1.- Repartición de Recursos.....                | 105 |
| IV.4.2.- Reducción de Tiempos en Función del Costo.. | 106 |
| <br>   |     |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....                            | 107 |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                            | 110 |

## INTRODUCCION

La elaboración del presente estudio tiene como propósito resaltar la importancia que tiene el área de la Geotécnia en la elaboración de proyectos. También pretende servir de guía para la programación e interpretación de las pruebas que se realizan en campo y laboratorio para la obtención de parámetros de suelo, así como su significado para el diseño de las cimentaciones.

El estudio geotécnico, se encuentra dividido en cuatro capítulos. En el primero se hace una breve reseña del fenómeno que se ha manifestado a lo largo de la historia del municipio de Irapuato en época de lluvias, asimismo, se define la zona en estudio resaltando las principales colonias que se ven afectadas sobre la margen del río Guanajuato. También se hace mención de los daños ocasionados por las continuas inundaciones. Finalmente, se exponen los motivos que dieron pauta al encauzamiento del río Guanajuato.

El segundo capítulo describe el marco geológico del municipio de Irapuato, con la finalidad de presentar la descripción de las condiciones estratigráficas y la posición del nivel de aguas freáticas en el sitio de estudio, además de localizar los bancos de materiales. Posteriormente se comentan las observaciones realizadas en el reconocimiento superficial de la zona, asignándose a su vez el número y ubicación de las secciones que se requieren para realizar el estudio, así mismo se describen las pruebas realizadas para la determinación de las propiedades índice y mecánicas en campo y laboratorio. Este capítulo concluye con la presentación de los resultados obtenidos en las pruebas descritas, y evalúa la calidad de los bancos seleccionados para el encauzamiento.

Una vez obtenidos los parámetros del suelo, se procedió a analizar la estabilidad de los bordes del cauce. En el capítulo III, se definen las secciones para realizar el análisis de estabilidad, con base al breve estudio hidráulico realizado. Posteriormente se presentan los principales factores a considerar en la evaluación de la estabilidad en función de la elección de las condiciones de análisis y las resistencias al corte, por otra parte, se presentan brevemente algunos métodos que se han desarrollado para analizar la estabilidad de taludes, los cuales se fundamentan en las teorías de la mecánica del medio continuo y del equilibrio límite.

En el cuarto capítulo, se propone un planteamiento para la integración de las etapas de planeación, programación y control de obra, las cuales sirven de base para la definición de los alcances de una supervisión geotécnica, de ninguna manera se pretende realizar una descripción exhausta al respecto, por lo que sólo se comentan algunos aspectos en cada etapa, que nos llevaran a una buena realización de la obra.

## CAPITULO I

## DESCRIPCION DEL PROYECTO

## I.1.- ANTECEDENTES.

Irapuato posee una conformación geográfica que lo hace susceptible a grandes encharcamientos, aunado a lo anterior a la presencia de dos importantes ríos llamados Guanajuato (Maese de Roa) y Silac, que aumentan notablemente sus cauces en temporadas de lluvias. Esta característica fue motivo de preocupación para las autoridades de la época Colonial, quienes planearon todo un sistema de presas, diques y puentes para tratar de controlar el peligro de las inundaciones. Existen algunos manuscritos originales de los siglos XVII y XIX, por lo tanto podemos asegurar que tales acontecimientos catastróficos la mayoría de las veces que se presentaban, repercutían siempre en aspectos de vital importancia para los pobladores, por la pérdida de sus bienes, sus casas, las cosechas y el peligro que ponía en riesgo sus propias vidas. Por ejemplo, en 1765 las proporciones de la catástrofe fueron tales que el Virrey intervino directamente, ordenando la construcción de las obras que librarán definitivamente a Irapuato de las inundaciones.

En las primeras décadas del siglo XX las autoridades continuaban realizando proyectos para controlar las inundaciones, pero en 1912 se presenta otra inundación de la cual se tienen algunas fotografías; y es el 18 de agosto de 1973 cuando el municipio sufre otra de las peores inundaciones de la historia, pues la situación resultó incontrolable, la precipitación pluvial fue excesiva y las presas sobrepasaron su capacidad, hasta provocar que las presas "La Llave" y "La Gaviota" reventaran, vertiendo a la vez su contenido en la de "El Conejo" cercana a la ciudad de Irapuato.

El bordo de la de "El Conejo" fue insuficiente para detener la presión que ejercieron millones de metros cúbicos de agua, a pesar de los esfuerzos de las autoridades y del ejército, el peligro para la ciudad se presentó en pocos minutos; las corrientes de las aguas retomaron los cauces que habían ocupado siglos anteriores, entrando a la ciudad sin consideración de persona o cosa que encontraba a su paso. El 17 de julio de 1976, nuevamente Irapuato se vio inundado aunque en menor proporción, pero también causo graves daños. Las inundaciones de 1973 y 1976 fueron las de mayor impacto a la ciudad de modo que provocaron pérdidas humanas. En la actualidad el problema continua pese a que se han construido algunas obras de control sobre los río Guanajuato y Silao.

El sector agrícola se ha visto fuertemente afectado por los desbordamientos de los ríos que en épocas de lluvia se manifiestan, provocando grandes pérdidas no sólo económicas sino humanas. La zona que ha sufrido principales afectaciones está comprendida entre la autopista de cuota a México y la vía de Ferrocarril que va a Querétaro, esta franja se localiza cerca del río Guanajuato. En los siguientes subcapítulos se resalta la importancia del municipio, asimismo se explican los motivos para la realización del encauzamiento del río.

## **I.2.- MEDIO FISICO Y GEOGRAFICO.**

### **I.2.1.- Localización.**

La ciudad de Irapuato, cabecera municipal, se ubica en los 100° 34' 09'' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich y a los 20° 46' 08'' latitud norte, la figura 1 muestra la localización regional; la altura de la ciudad es de 1,795 metros sobre el nivel del mar .

La superficie del territorio municipal es de 786 kilómetros cuadrados, equivalentes al 2.6 por ciento de la superficie total del estado.

Limita al norte con los municipios de Guanajuato y Silao; al sur con los de Abasolo y Pueblo Nuevo; al este con el de Salamanca; y al oeste con los de Abasolo y Romita.



fig. 1 Localización de Irapuato Guanajuato.

### 1.2.2.- Hidrografía.

El río Temascalío corre al oriente del municipio; sus principales afluentes son los arroyos Temascalío y Copal; el río Guanajuato tiene cauce al noroeste del municipio y son sus afluentes el arroyo Tepalcatepec y el río Silao, además de tener dos pequeños ramales que son los arroyos Santa Rita y El Carrizalito.

El municipio tiene varios canales de derivación de las aguas del río Lerma y la presa del Conejo, que forma parte de un sistema contenedor de aguas de la región.

### I.2.3.- Clima.

El clima en la ciudad de Irapuato se clasifica como semi-cálido, sub-húmedo con lluvias en verano. Su temperatura máxima es de 37.4°C y la mínima es de 0.8°C. La temperatura media anual es de 21°C, la precipitación pluvial anual máxima es de 2,450 mm., la mínima anual es de 1,900 mm y la total anual es de 2,175 mm.

Los vientos son templados con pequeñas variaciones durante el año, soplan generalmente del Noroeste al Sureste, con velocidades variables que pueden ir de los 5 kilómetros hasta los 70 kilómetros por hora, en su caso extremo.

### I.2.4.- Orografía.

El territorio municipal carece de grandes elevaciones y sólo destacan algunos cerros y lomas como: Cerro de San Roque, Estación de Buenavista, Cerro de la Garrida, parte del Cerro del Huilote, Arandas y Bernalejo, las lomas de los Conejos, El Copal, La Calera, Lo de Juárez, Lo de Sierra, Puerto Blanco, Jaripitío, Cañada de la Muerte y Lomas de Temascatio.

### I.2.5.- Clasificación y Uso del Suelo.

*Suelo:* El tipo de suelo existente en toda el área es de tipo aluvial y tienen una textura que va de franco arenoso a arcillo arenosa, con un pH de 6.0 a 8.9.

*Uso del suelo:* Es de uso agrícola, la zona de temporal permanente abarca el área de Loma Pelada y la demás área es de riego, como se logra apreciar en la figura 2.

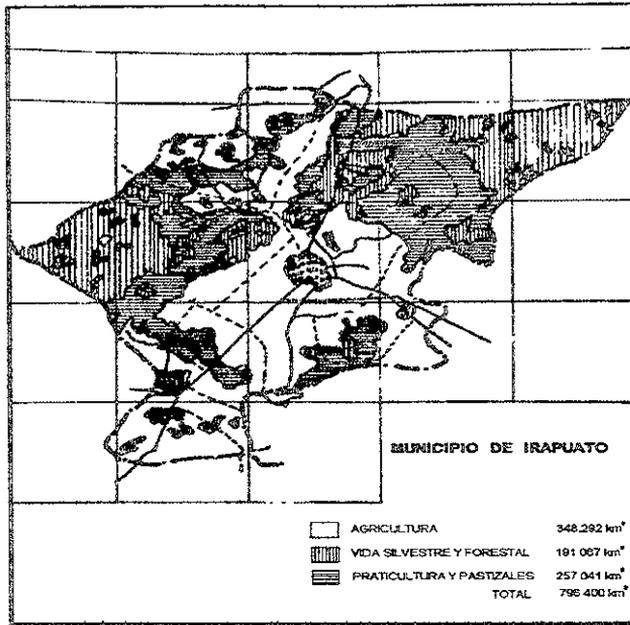


fig. 2 Uso potencial del suelo

#### 1.2.6.- Sismicidad.

Con base a la macronificación sísmica, al estado de Guanajuato le corresponden dos zonas: la porción norte donde no se registran movimientos sísmicos (zona asísmica) y la porción sur que sufre pocos sismos (zona penisísmica). La primera ocupa la mayor parte del estado; la segunda se encuentra hacia el centro y sur del estado. Irapuato pertenece a la zona penisísmica, la cual ha reportado sismos de 1 a 5 grados en la escala de Richter; por esta misma zona pasa la falla de Zacamboxo, que se une a la falla de San Andrés y a la falla Transísmica.

#### 1.2.7.- Flora y Fauna.

La vegetación está constituida por matorral sub-tropical, predominando: La ipomea (casahuate), la opuntia (nopal) y la acacia (huisaches) asociados con

pastizal inducido. Los mamíferos más característicos son los siguientes: tusa, musaraña, zacatuche, ratón de bosque y rata de los volcanes; y en cuanto a las aves, las más comunes son: codorniz, chuparrosa, correcaminos, chupamirto, ruiseñor, gorrión, trepatroncoso y garzas.

### **I.3.- MARCO SOCIAL.**

#### **I.3.1.- Población.**

El XI Censo General de Población y Vivienda, 1990 arrojó una población de 362,915 habitantes. La densidad de población es de 388 habitantes por kilómetro cuadrado y la tasa de crecimiento llega al 3.7 por ciento.

#### **I.3.2.- Educación, Cultura, Recreación y Deporte.**

Existe en el municipio una infraestructura educativa que, en términos generales, atiende con suficiencia la demanda en todos los niveles. La tasa de población que no asiste a la escuela en los niveles preescolares y primario es del 1.50 por ciento, mientras que el índice de analfabetismo es del 16 por ciento (1990). Se estima que la infraestructura para la educación media y superior es suficiente para atender la demanda, a través de instituciones del sector público y privado; por lo que se refiere al nivel superior, existen diversas escuelas terminales de la Universidad de Guanajuato (UG), tanto en los ramos tecnológicos como de ciencias y humanidades. También se cuenta con escuelas superiores particulares, entre las que se encuentran una unidad del Tecnológico de Monterrey (TM) y la Universidad de Quetzalcóatl de Irapuato (UQI).

Las instalaciones e instituciones dedicadas a la cultura, es amplia y diversa y se compone principalmente de museos, teatros, parques recreativos, cines y centros nocturnos; la infraestructura deportiva es diversa y numerosa, contando con gimnasios, unidades deportivas y canchas para la práctica de todas las ramas del deporte.

### I.3.3.- Salud.

En la cabecera municipal se proporciona atención médica en los tres niveles, mientras que en la zona rural se proporciona la atención básica a través de unidades médicas rurales; canalizando los casos que así lo requieran, para tratamientos especializados a la ciudad de Irapuato, en donde existen diversas clínicas de especialidades tanto del sector oficial como del privado. El sector oficial proporciona la atención a través del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y la Secretaría de Salud (SSA).

### I.3.4.- Vivienda.

El alto índice en la tasa de crecimiento poblacional ocasiona un déficit significativo en el aspecto de vivienda, lo que da como resultado un elevado promedio en el número de ocupantes por casa-habitación y la existencia de varios asentamientos irregulares en la periferia de la ciudad.

En la confluente del río Guanajuato y el arroyo Santa Rita (colonias Lucio Cabañas, Luis Alonso González, Pronasol, Ernesto Che Guevara), se ha incrementado el número de viviendas que pueden ser fuertemente afectadas por el desbordamiento del río, ya que los habitantes de esta zona han formado veredas para cruzar el cauce; una segunda región que continuamente es afectada potencialmente por el río es la formada por las colonias San Roque, Colon y 18 de Agosto, en las cuales se ha extendido la zona habitacional; las escuelas contiguas al cauce en esta zona, se han visto afectadas por el desbordamiento del río Guanajuato.



### **I.3.6.- Servicios Públicos.**

El gobierno municipal proporciona a la ciudadanía los servicios de agua potable y alcantarillado, alumbrado público, limpia y recolección de basura, mercados y centrales de abasto, parques y jardines, seguridad pública, regulación urbana y estacionamientos públicos.

### **I.4.- MARCO ECONOMICO.**

#### **I.4.1.- Población Económicamente Activa.**

La población económicamente activa (PEA) alcanza el 32 por ciento del total, de la cual el 12.59 por ciento se dedica al sector primario; el 21.75 por ciento al sector secundario; el 19.21 por ciento al sector terciario, y el resto a otras actividades.

#### **I.4.2.- Actividades Económicas.**

*Agricultura:* El municipio ocupa a nivel nacional un lugar predominante como productor de fresa y espárrago. Se cultiva también alfalfa, jitomate, chicharo, pepino, avena, brócoli, cebada, cebolla, maíz, sorgo y trigo, lo que nos da una clara idea de la riqueza de sus tierras y la bondad de su clima.

*Ganadería:* El municipio está considerado como uno de los mejores productores de ganado porcino en el estado, existiendo también la cría de otras especies mayores como bovino, caprino, equino y ovino.

*Industria:* La actividad industrial del municipio es poco diversificada, significándose la relacionada con la fabricación de textiles, procesamiento de alimentos; tratamiento de sustancias químicas y fabricación de muebles.

*Minería:* La actividad se reduce a la explotación de algunos bancos de cal, yeso y arena, que abastecen de estos materiales a toda la región.

*Turismo:* La actividad turística es de relativa importancia, a pesar de que no existe la infraestructura de servicio adecuado. El atractivo en este aspecto se limita a lo relacionado con los monumentos arquitectónicos; sin embargo, la proximidad con otros municipios que cuentan con grandes atractivos turísticos, como Abasolo y Guanajuato (capital), propicia una fuerte afluencia turística.

*Comercio:* En la ciudad de Irapuato se localizan grandes e importantes centros comerciales con artículos textiles; bienes de consumo básico; maquinaria e implementos agrícolas y otros. El intercambio comercial se establece con los municipios vecinos y el Distrito Federal.

*Servicios:* La infraestructura de servicios la integran numerosos hoteles que incluyen todas las categorías, con un total de 1,200 habitaciones; restaurantes de cocina nacional e internacional y un aceptable servicio de transporte urbano.

## **I.5.- ORIGEN DEL PROYECTO.**

### **I.5.1.- Exposición de Motivos.**

Las constantes inundaciones que ha padecido la ciudad de Irapuato son provocadas por los ríos Silao, Guanajuato y Temascalío. En época de lluvia estos ríos al presentar su máxima capacidad retoman su cauce original presentando desbordamientos. El presente estudio se limita a revisar la zona comprendida entre La Garrida y la autopista de cuota a México, sobre el río Guanajuato, y también sus afluentes los arroyos Santa Rita y El Carrizalito, ambos con una longitud aproximada de 2 kilómetros; estas afluentes han a portado en mayor medida el gasto suficiente para provocar el desbordamiento. El último gasto importante del cauce fue registrado el 6 de septiembre de 1996, con una aportación de  $140 \text{ m}^3/\text{s}$ , que provocó encharcamientos de 1.80 m, en partes bajas además de afectar 2,000 viviendas y dejar a 2,000 damnificados.

Los motivos para encauzar el río Guanajuato se resumen a continuación:

- Pérdida potencial de vidas humanas.
- Afectación a viviendas.
- Daños a zonas agrícolas.
- Avería de servicios públicos.
- Perjuicio a industrias e instalaciones de almacenamiento de PEMEX.

Estos daños se han presentado a lo largo de la historia del río en menor grado, en la actualidad afecta a una población considerable de la ciudad, debido a los asentamientos irregulares que se han dado en los últimos años sobre la margen del cauce, por lo cual la Comisión Nacional del Agua (CNA) decidió realizar el estudio geotécnico para llevar a cabo el encauzamiento del río Guanajuato , y así solucionar el problema de las inundaciones.

#### **I.5.2.- Encauzamiento del Río Guanajuato.**

El encauzamiento de un río consiste en modificar las condiciones geométricas del cauce en función del proyecto hidráulico, a fin de evitar el desbordamiento.

El proyecto geotécnico para desarrollar la obra consiste en seleccionar los materiales adecuados para la construcción de terraplenes y revestimiento del cauce, así como diseñar las cimentaciones de las obras complementarias como puentes peatonales y vehiculares.

### **I.5.3.- Descripción del Proyecto Geotécnico.**

El estudio que se presenta tiene por objeto definir los siguientes puntos:

- Propiedades índice, mecánicas e hidráulicas del subsuelo, tanto del sitio como de los bancos posibles de préstamo.
- Evaluar la calidad de los bancos.
- Revisar la estabilidad de los taludes con base a las secciones propuestas por el proyecto hidráulico.
- Diseñar geotécnicamente la cimentación de las obras complementarias.
- Dar recomendaciones para el procedimiento constructivo.

En los siguientes capítulos se describe detalladamente estos puntos y se presentan los resultados obtenidos

## CAPITULO II

## EXPLORACION Y ENSAYES DE LABORATORIO

## II.1.- GENERALIDADES.

Para la elaboración de este capítulo se definirán los conceptos de geología, suelo y roca desde el punto de vista de Ingeniería Civil, con el propósito de aplicarlos posteriormente.

“Geología, es la amplia esfera de la investigación científica que estudia la composición y la disposición de la corteza terrestre.”<sup>1</sup> De las divisiones de la geología que se aplican a los problemas de Ingeniería Civil, pueden mencionarse: la hidrología, la petrografía, la estratigrafía, la geología estructural y la geofísica.

Se define al *suelo* como cualquier material no consolidado compuesto de partículas sólidas, incluyendo líquidos y gases, abarcando todos los depósitos sueltos o moderadamente cohesivos (gravas, arenas, limos y arcillas) hasta areniscas. Para el presente estudio entenderemos el concepto de suelo como “el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de descomposición química de rocas preexistente.”<sup>2</sup> Este concepto se ilustra con la figura 4.

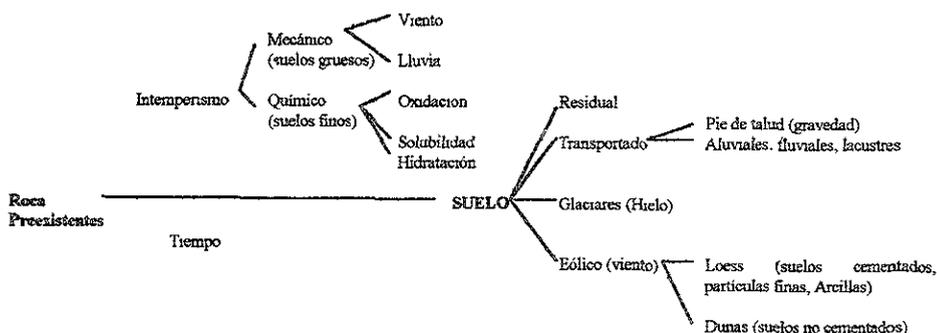


fig 4 Origen de los suelos

<sup>1</sup> Robert F. Legget. *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil*. Capítulo I Editorial Mc Graw-Hill, 1986. p. 1

<sup>2</sup> Carlos Crespo Villalaz *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Capítulo I. Editorial Limusa 1980 p 18

De la división de los suelos que se observa en la figura 4, se definen únicamente los suelos residuales y transportados, por presentarse superficialmente en la zona de estudio.

*Suelos Residuales.* Son aquellos que permanecen en el mismo lugar, directamente sobre la roca madre de la cual fueron derivados.

*Suelos Transportados.* Son aquellos que se han movido a partir de las rocas que los originaron y han sido depositados en otros lugares.

“La roca es un agregado natural de minerales unidos por fuerzas cohesivas fuertes y permanentes.”<sup>3</sup> Puesto que los términos fuerte y permanente, están sujetos a diferentes interpretaciones, el límite entre suelo y roca es necesariamente arbitrario. Los productos de la destrucción de las rocas con partículas de dimensiones de grava o más pequeñas, son llamados suelos, mientras que los cantos rodados y los peñascos se consideran como fragmentos de roca. Los geólogos clasifican a las rocas en tres grupos básicos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

*Rocas ígneas.* Son aquellas que se forman por el enfriamiento del magma; se clasifican de acuerdo a su textura, composición, color y origen.

*Rocas sedimentarias.* Las rocas expuestas a los agentes del intemperismo son reducidas a partículas fragmentadas que pueden ser transportadas por el viento, agua y hielo; cuando dichos agentes dejan de actuar, estas partículas se denominan sedimentos.

*Rocas metamórficas.* Son el producto del metamorfismo a través de altas temperaturas y presiones actuando sobre las rocas sedimentarias y con menos frecuencia den las rocas ígneas que se encuentran a grandes profundidades. Durante el proceso de metamorfismo la roca original sufre alteraciones físicas y químicas que cambian su textura, así como también la composición química del mineral.

<sup>3</sup> Juan B. Puig de la Parra. *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil y fotointerpretación.* Capítulo III. Editorial Juventud 1970.

## II.2.- MARCO GEOLOGICO REGIONAL.

La recopilación geológica que se lleva a cabo en esta etapa tiene como objetivo proporcionar información preliminar para el proyecto de la obra, estos datos sirven para localizar tipos de roca que se encuentran y distribución, presencia de fallas de importancia o de excesivo fracturamiento, profundidad a que ha actuado el intemperismo para estimar una cimentación o un corte, posibilidad de conseguir yacimientos de material para construcción, profundidad de los rellenos de los valles y condiciones generales de las aguas superficiales y subterráneas en el lugar.

### II.2.1.- Geología Regional.

En el Estado de Guanajuato existen afloramientos de todo tipo de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas; sus edades varían desde el mesozoico hasta el reciente. Las más antiguas corresponden a metamórficas del triásico-jurásico, sedimentarias del cretácico y las que constituyen la mayoría de las rocas del estado, ígneas extrusivas del cenozoico (terciario y cuaternario). Las estructuras en estas últimas son aparatos volcánicos, coladas de lava, fallas regionales, fracturas y vetas de diferentes dimensiones.

La importancia de la geología en el Estado radica fundamentalmente en la minería. Por otra parte, una peculiar conformación geológica ha permitido la existencia y explotación de acuíferos subterráneos, principalmente en las partes central y sur de la entidad. Existen tres grandes regiones en la zona, cada una de ellas con origen particular y caracteres geológicos distintivos: la Meseta Central, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental (*fig5*). El municipio de estudio se encuentra ubicada en el Eje Neovolcánico, razón por la cual únicamente se analizará dicha zona.



*fig. 5 Provincias Geológicas.*

#### **II.2.1.1.- Eje Neovolcánico.**

Esta provincia colinda al norte con la Meseta Central y sus límites se definen por el cambio de morfología de mesetas a vertientes montañosas. Se considera que se trata de una antigua sutura reabierto a fines del cretácico que formó un sistema volcánico transversal a las sierras Madre Oriental y Madre Occidental. Se caracteriza por la presencia de una gran cantidad de aparatos volcánicos diversos-conos, calderas y coladas- que en su mayoría han conservado intacta su estructura original.

Existen también en el lugar, gran cantidad de fracturas y fallas asociadas al vulcanismo terciario y cuaternario que han dado lugar a fosas largas y de alguna profundidad, y que han formado lagos como el de Yuriria.

#### **II.2.1.2.- Estratigrafía.**

En esta provincia se presentan rocas ígneas y sedimentarias del terciario, así como los aluviones que han llenado valles y llanuras, originando los suelos de esas áreas que provienen del cuaternario. La relación completa de rocas asociadas a las edades en que aparecieron se enlistan en la tabla 1.

| EJE NEOVOLCÁNICO                      |   |  |   |  |
|---------------------------------------|---|--|---|--|
| EDAD                                  | LITOLOGÍA   | CLAVE  | UBICACIÓN   |  |
| CENOZOICO                             | Rocas ígneas Extrusivas<br>andesita, riolita, toba,<br>ígneas, basalto, brecha<br>volcánica | (Ige)  | Al noroeste de León   |  |
|                                       |   |  | Al norte de Silao   |  |
|                                       |   |  | La porción suroeste del estado en sus límites con Jalisco y Michoacán |  |
|                                       | (T) Terciario   | Rocas Sedimentarias<br>caliza y travertino                     | (Quim)  | La Sierra de Penjamo                       |
|                                       |   |  |   | Valle de Santiago y alrededores de Yuriria |
|                                       |   |  |   | Al oeste de Irapuato                       |
| Calizas, areniscas y tobas            | (cl-Quim)   | Al oriente de Tarimoro   |   |  |
|                                       |   | Al sur de Salvatierra  |   |  |
|                                       |   | Alrededores de Acámbaro  |   |  |
| Areniscas-conglomerado y tobas        | (cl)  | En el extremo sureste del estado, en sus límites con Querétaro |   |  |
|                                       |   | El Cerro Godoy   |   |  |
|                                       |   | Alrededores de San Francisco del Rincón                        |   |  |
| (Q) Cuaternario                       | Rocas ígneas Extrusivas<br>Basaltos   | (Ige)  | Rincón Al noroeste de Silao   |  |
|                                       |   |  | Al sur de Guanajuato, Gto   |  |
|                                       |   |  | Al oriente de Juventino Rosas   |  |
| Rocas Sedimentarias<br>arcas y gravas | (cl)  | Al oriente de Irapuato   |   |  |
|                                       |   | Al norte de Romita de Iiceaga                                  |   |  |
|                                       |   | Alrededores de San Francisco del Rincón                        |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | Al oeste de San Francisco del Rincón                           |   |  |
|                                       |   | Al norte de Jesús del Monte                                    |   |  |
|                                       |   | Al sur de Irapuato   |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | Al norte y noroeste de Salamanca                               |   |  |
|                                       |   | Al norte de Apaseo el Grande                                   |   |  |
|                                       |   | Al sur de Cortázar   |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | Al sur y sureste de Celaya                                     |   |  |
|                                       |   | Alrededor de Apaseo el Alto                                    |   |  |
|                                       |   | Alrededor de Jerécuaro   |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | En el borde oriental de la Sierra de Penjamo                   |   |  |
|                                       |   | En el borde sur de la Sierra de los Agustinos                  |   |  |
|                                       |   | Al norte de Jerecuaro  |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | Toda la planicie del Bajío                                     |   |  |
|                                       |   | Al norte y occidente de Acámbaro                               |   |  |
|                                       |   | En el margen occidental de Acámbaro                            |   |  |
| Suelos aluvial residual lacustre      | (S)   | En el margen occidental de la Laguna Yuriria                   |   |  |
|                                       |   | Al sur de San Francisco del Rincón                             |   |  |

Tabla 1 Distribución de Rocas.

Dentro del estado de Guanajuato, y perteneciendo al Eje Neovolcánico, quedan representadas cinco subprovincias: todo el Bajío Guanajuatense, partes de los Altos de Jalisco, las Sierras Volcánicas y Bajíos Michoacanos, los llanos de Querétaro y por último las Sierras y Lagos del Centro. La descripción detallada se hará de la Subprovincia del Bajío Guanajuatense, lugar donde se encuentra localizado el municipio de Irapuato.

### II.2.1.3.- Subprovincia del Bajío Guanajuatense.

El Bajío Guanajuatense es una gran llanura, interrumpida por relativamente pocas sierritas volcánicas, mesetas lávicas y lomeríos, que incluyen los municipios de Abasolo, Huanímaro, Irapuato, Pueblo Nuevo, Romita, Salamanca, San Francisco del Rincón, Silao y Villagran y partes de los de Apasco el Grande, Celaya, Ciudad Manuel Doblado, Cortázar, Cuernámaro, Guanajuato, Jaral del Progreso, León, Purísima del Rincón, Santa Cruz de Juventino Rosas y Valle de Santiago.

A las llanuras, sierritas, mesetas y lomeríos se asocian siete sistemas de topofomas que son: llanuras de aluviones profundos, llanura con tepetate a poca profundidad, sierras de laderas tendidas, sierras de cumbres escarpadas, mesetas con lomeríos, lomeríos asociados con mesetas y lomeríos aislados.

El gran Valle del Bajío está integrado por los rellenos lacustres de edad terciario superior, formados por gravas, arenas y arcillas observándose en ellos una clara estratificación horizontal. El espesor de estos materiales es muy variable pues se depositaron sobre una superficie muy irregular debido al tectonismo y vulcanismo que lo afectó.

### II.2.1.4.- Suelos.

Por su origen los suelos de la región son de dos tipos: transportados y residuales. De acuerdo a sus unidades de clasificación, identificamos los siguientes:

- Vertisoles pélicos.- son vertisoles negros o gris oscuro.
- Castañozem.- suelos que se caracterizan por tener una capa superior de color pardo o rojizo oscuros, rica en materia orgánica y nutrientes y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo.

- Castañozem cálcicos.- caracterizados por tener acumulación de caliche suelto en una capa de color claro, de más de 115 cm de espesor.
- Feozem calcáricos.- tiene como característica, la presencia de cal en todos sus horizontes. Son los Feozems más fértiles y productivos en la agricultura o ganadería, cuando son profundos y planos. Su susceptibilidad a la erosión es variable en función del tipo de terreno.

En la zona de estudio (río Guanajuato), existen varios pozos de explotación de agua subterránea, de los cuales se cuenta con el corte litológico registrado en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua (CNA), algunos de los cortes se registraron en el año de 1981; los más cercanos a la zona de estudio se mencionan a continuación con el propósito de dar una idea del material que subyace en el subsuelo.

| EJIDO LA GARRIDA MPIO. DE IRAPUATO, GTO |             | EJIDO CARRIZAL MPIO. DE IRAPUATO, GTO |                        |
|---|-------------|---------------------------------------|------------------------|
| PROFUNDIDAD<br>(MTS)                    | DESCRIPCION | PROFUNDIDAD<br>(MTS)                  | DESCRIPCION            |
| 0 - 3                                   | Arenas      | 0 - 3                                 | Terreno vegetal        |
| 3 - 7                                   | Grava       | 3 - 4                                 | Gravas                 |
| 7 - 27                                  | Boleos      | 4 - 6                                 | Tobas                  |
| 27 - 30                                 | Arcilla     | 6 - 9                                 | Boleos                 |
| 30 - 36                                 | Boleos      | 9 - 10                                | Arena gruesa           |
| 36 - 40                                 | Gravas      | 10 - 16                               | Arcilla                |
| 40 - 55                                 | Arcilla     | 16 - 18                               | Arena mediana          |
| 55 - 60                                 | Gravas      | 18 - 24                               | Arcilla                |
| 60 - 66                                 | Boleos      | 24 - 35                               | Roca(Basalto alterado) |
| 66 - 68                                 | Gravas      | 35 - 39                               | Tezontle               |
| 68 - 81                                 | Tobas       | 39 - 42                               | Tezontle               |
|   |             | 42 - 55                               | Gravillas cementadas   |
|   |             | 55 - 70                               | Tobas                  |
|   |             | 70 - 93                               | Tobas con grava        |

| EJIDO COPALILLO MPIO. DE IRAPUATO, GTO |                 | EJIDO SAN ROQUE MPIO. DE IRAPUATO, GTO |                  |
|--|-----------------|--|------------------|
| PROFUNDIDAD<br>(MTS)                   | DESCRIPCION     | PROFUNDIDAD<br>(MTS)                   | DESCRIPCION      |
| 0 - 2                                  | Terreno vegetal | 0 - 6                                  | Arcillas         |
| 2 - 13                                 | Arena           | 6 - 24                                 | Basalto          |
| 13 - 15                                | Grava           | 24 - 28                                | Tezontle         |
| 15 - 16                                | Arcilla         | 28 - 32                                | Basalto alterado |
| 16 - 27                                | Boleo           | 32 - 70                                | Basalto          |
| 27 - 30                                | Arcilla         | 70 - 74                                | Basalto alterado |
| 30 - 35                                | Boleo           | 74 - 84                                | Basalto          |
| 35 - 37                                | Arcilla         | 84 - 94                                | Basalto alterado |
| 37 - 48                                | Boleo           | 94 - 102                               | Basalto          |
| 48 - 49                                | Arcilla         | 102 - 105                              | Basalto alterado |
| 49 - 58                                | Boleo           | 105 - 166                              | Basalto          |
| 58 - 68                                | Arcilla         | 166 - 172                              | Basalto alterado |
| 68 - 74.5                              | Boleo           | 172 - 194                              | Basalto          |
| 74.5 - 78.5                            | Arcilla         | 194 - 200                              | Basalto alterado |
| 78.5 - 86                              | Boleo           |  |                  |
| 86 - 112                               | Toba arcillosa  |  |                  |

### II.2.1.5.- Geohidrología.

Los acuíferos en explotación en la región del Bajío se encuentran alojados en un paquete de depósitos lacustres estratificados, formados por gravas, arenas y arcillas de color beige, de mediana permeabilidad, de espesor variable las cuales descansan hacia el sur sobre coladas basálticas, de buena permeabilidad debido a fracturamiento. Hacia el norte, los materiales descritos descansan sobre depósitos de rocas riolíticas, permeables por fracturamiento, los que alojan un acuífero termal que produce agua con temperaturas del orden de los 40°C.

En la mayor parte del área, los acuíferos, termal inferior contenido en las rocas riolíticas y el frío superior contenido en materiales granulares y rocas basálticas actúan conjuntamente por carecer de un confinante que los separe.

Geohidrológicamente, el área se encuentra fuertemente sobre explotada mediante la operación de pozos lícitos e ilícitos, que son utilizados para sistema de riego. El abatimiento de los niveles del área han traído como consecuencias:

- Abandono de norias y pozos someros.
- Disminución de caudales extraídos.
- Declaración de veda rígida a la explotación de aguas subterráneas y recientemente la
- Subsistencia de terrenos.

#### II.2.1.6.- Subsistencia.

El avance de las fallas geológicas en Irapuato es incontenible, y tiene un desarrollo inexorable, en su gran mayoría las fallas localizadas, y se ubican en diagonal del nororiente al surponiente del municipio. Estas fallas no sólo se perciben en el núcleo poblacional, sino también en el medio rural en donde hay discontinuidades ostensibles; como ejemplo se tiene "La Falla de San Roque" localizada en la zona del presente estudio (*fig. 6*).

Las fallas existentes son originadas por el abatimiento del nivel estático regional de acuíferos en explotación, al principio los efectos fueron poco sensibles debido a su ritmo lento y a que el hundimiento fue uniforme en todo el valle, pero a última fecha los efectos son más notables ya que la sobreexplotación de agua subterránea de nuevos pozos ilícitos ha aumentado.

Para aminorar o frenar este tipo de hundimientos y fallas se recomienda los siguientes puntos:

- a) Reciclaje de aguas industriales.
- b) Utilización de aguas negras para riego agrícola, no incrementando áreas bajo riego sino eliminando pozos.

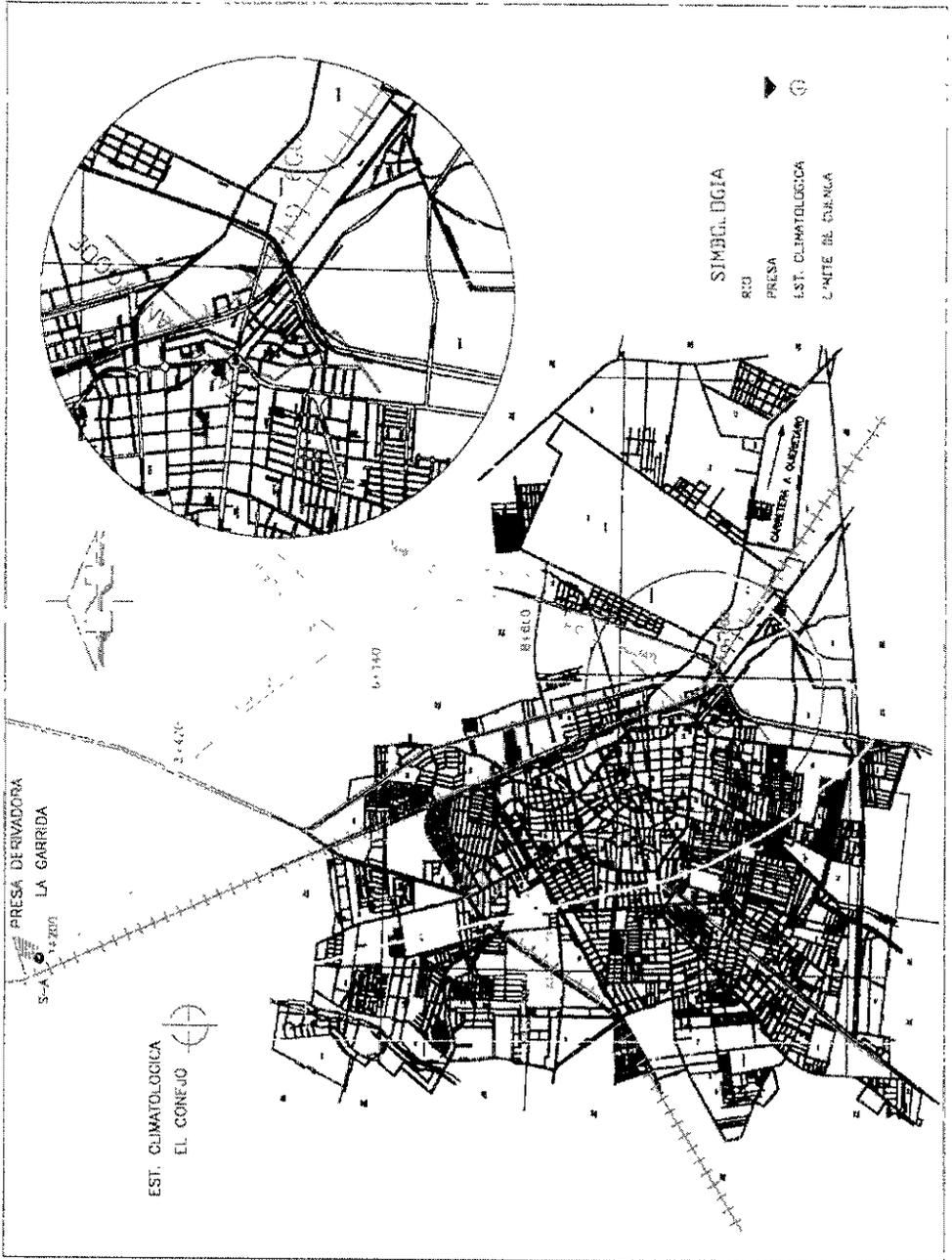


FIG.6 UBICACION DE LA FALLA SAN REGUE

- c) Utilización de aguas negras tratadas, para riego de jardines.
- d) Tecnificación de sistemas de riego y cambio de cultivos, a fin de economizar agua en las zonas agrícolas aledañas a la ciudad.
- e) Recarga artificial de acuíferos.

Se desconoce si las autoridades locales o federales tienen alguna estrategia para evitar el avance del efecto de las fallas.

### II.3.- INSPECCION DIRECTA.

#### II.3.1.- Reconocimiento Superficial en Zona de Estudio.

El reconocimiento realizado a lo largo del cauce del río Guanajuato y sus afluentes (Arroyos Santa Rita y Carrizalito), consistió en efectuar una inspección visual del estado de los bordos y del cauce, de donde se desprenden las siguientes observaciones:

1. Presencia de abundante vegetación y basura (*fig. 7*).
2. Zonas donde los bordos se encuentran altamente intemperizados presentando socavaciones.
3. En la formación de los bordos predomina el material limo-arenoso, y en algunas secciones se detectó la presencia de arena.
4. Al final del tramo en estudio se observó superficialmente la presencia de materiales productos de demoliciones (cascajo), colocado sin ningún control de compactación.
5. La zona de falla geológica se ubica sobre el cauce (*fig. 6*).
6. En algunos puntos del cauce los pobladores de la zona han formado pequeñas veredas para cruzar el río.
7. Se localizaron posibles bancos de materiales a una distancia de 3 a 30 km, del cauce.



*fig. 7 Condición Actual del Río Guanajuato.*

El recorrido sobre el cauce permitió definir el número y ubicación de secciones que se requieren para realizar el estudio geotécnico

En cuanto a bancos de materiales cabe mencionar que los bancos localizados cercanos al cauce no cuentan con grandes volúmenes de material y para cumplir con el volumen de proyecto será necesario recurrir a varios sitios. Algunos de los bancos localizados con las características requeridas para el proyecto, se encuentran retirados del cauce debido a que la mayor parte de zona de estudio es agrícola.

Posiblemente el material al pie del río cumple con las propiedades requeridas, sin embargo es de muy poco espesor como lo han demostrado los cortes litográficos citados y la observación de las discontinuidades en los terrenos aledaños.

## II.4.- SONDEOS EXPLORATORIOS Y EXTRACCION DE MUESTRAS.

### II.4.1.- Tipos de Sondeos Realizados.

Los tipos de sondeos que se realizaron para fines de muestreo de conocimiento del subsuelo, fueron los siguientes:

#### *Métodos de exploración de carácter preliminar.*

- a) Pozos a cielo abierto, con muestro alterado o inalterado.
- b) Métodos de penetración estándar.

#### *Métodos de sondeo definitivo.*

- a) Pozos a cielo abierto con muestreo inalterado.
- b) Métodos con tubo de pared delgada.

#### II.4.1.1.- Pozos a Cielo Abierto.

Este método es el más satisfactorio para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en excavar pozos de 1 m. por 1.5 o 2 m, hasta una profundidad de unos 5 m (la cual es función del nivel de aguas freáticas y de la estabilidad de las paredes), o bien, hasta encontrar material no excavable con pico y pala, como tepetate, roca, etc. Estas dimensiones deben de ser suficientes para que un técnico pueda directamente bajar y examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural, así como darse cuenta de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el suelo (*fig. 8*).

En estos pozos se pueden tomar muestras alteradas o inalteradas de los diferentes estratos encontrados. Las muestra alteradas consiste en la recuperación de muestras en las que el acomodo estructural de sus partículas se han modificado en forma significativa debido al proceso de muestreo. Estas muestras se utilizan en el laboratorio para identificar los suelos, determinar algunas propiedades índice, definir la estratigrafía y preparar especímenes compactados o reconstituidos.



*fig 8 Pozo a Cielo Abierto.*

Las muestras inalteradas del suelo deben conservar prácticamente las condiciones del acomodo estructural de sus partículas sólidas, sin embargo la relajación de esfuerzos induce modificaciones de sus características y comportamiento mecánico que pueden ser ligeras o importantes dependiendo del cuidado y la técnica con que se obtengan. Estas muestras se utilizan en el laboratorio para identificar los suelos y determinar sus propiedades índice y mecánicas.

Considerando las características del proyecto y las especificaciones indicadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA), se llevo a cabo la construcción de 41 pozos a cielo abierto a 3.00 m, en 13 secciones (de la sección "A" a la sección "N" sobre el río Guanajuato y afluentes), donde se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas la cuales fueron debidamente protegidas para su traslado al laboratorio.

Para determinar la ubicación de las secciones se consideraron una o más de las siguientes características:

1. Se requiere construir un paso peatonal.
2. Es necesario construir o adecuar un paso vehicular.
3. Se encuentra muy cerca una zona habitacional.
4. Se localiza el entronque de río con sus afluentes.
5. Zona por donde pasa "La Falla de San Roque".

En la tabla 2 se presenta un listado de las secciones mencionadas, así como los pozos construidos respectivamente.

Tabla 2. Secciones de Estudio.

| Sección | No. de pozos | Cauce              | Kilómetro        |
|---------|--------------|--------------------|------------------|
| A       | 3            | Río Guanajuato     | 0+200            |
| B       | 3            | Río Guanajuato     | 1+300            |
| *C      | 6            | Río Guanajuato     | 2+700            |
| D       | 2            | Río Guanajuato     | 3+900            |
| E       | 3            | Río Guanajuato     | 4+780            |
| *F      | 7            | Río Guanajuato     | 6+200            |
| G       | 4            | Arroyo Carrizalito | 6+140<br>(1+100) |
| H       | 4            | Río Guanajuato     | 6+700            |
| *I      | 3            | Río Guanajuato     | 7+900            |
| *J      | 3            | Río Guanajuato     | 8+700            |
| K       |              | Río Guanajuato     | 9+285            |
| *L      | 1            | Río Guanajuato     | 10+776           |
| M       | 6            | Río Guanajuato     | 11+800           |
| N       | 3            | Arroyo Sta. Rita   | 8+660<br>(0+280) |

Las secciones marcadas con el asterisco, corresponden a 5 zonas identificadas como críticas en el cual se realizaron sondeos de tipo mixto. La ubicación de las secciones y sondeos realizados se muestra la figura 9.



Después de efectuar el reconocimiento en la zona, se identificaron los sitios que podrán servir como bancos de material tanto para la formación de terraplenes como para el revestimiento de los bordos existentes. La tabla 3 presenta una relación de los pozos construidos en cada uno de los posibles sitios de explotación, así como su utilización.

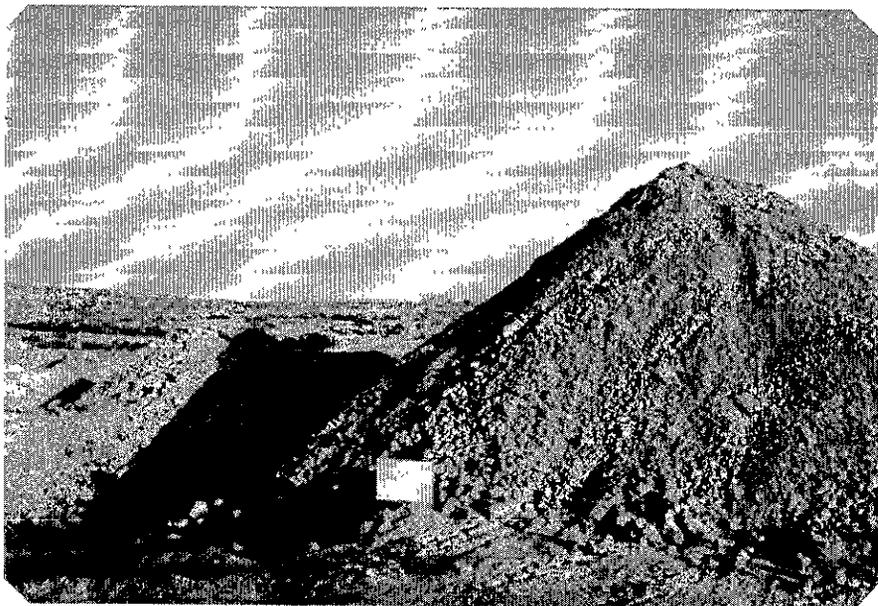
*Tabla 3 Bancos de Materiales.*

| Banco     | Utilización   | No. de Pozos | Prof. en metros |
|-----------|---------------|--------------|-----------------|
| El conejo | Terraplén     | 4            | 3.00            |
| Fonseca   | Terraplén     | 2            | 3.00            |
| Ceferino  | Terraplén     | 2            | 3.00            |
| Aldama    | Terraplén     | 2            | 3 00            |
| La calera | Terraplén     | 2            | 3 00            |
| Ceferino  | Revestimiento | 1            | 3.00            |
| Contreras | Revestimiento | 1            | 3.00            |
| La ladera | Revestimiento | 2            | 3.00            |
| El gato   | Revestimiento | 1            | 3.00            |

La descripción de cada banco, así como su distancia al cauce es:

1. El Conejo, es un área ubicada en la ribera de la presa del mismo nombre, se encuentra a 2.00 km de distancia de la compuerta la Garrida.
2. Fonseca, se localiza al lado poniente del cauce del río aproximadamente en el km 1+200 a partir de La Garrida.
3. Ceferino, se ubica frente a la trituradora localizada a la margen izquierda del cauce del río en el km 2+200, a partir de La Garrida hacia aguas abajo.
4. Aldama, se encuentra en las instalaciones de la trituradora conocida con el mismo nombre en el poblado de Aldama, localizado a 23 km del cauce, por la carretera hacia el municipio de León Gto., el material que se pretende utilizar de este banco es producto del despalme de la planta trituradora (*fig. 10*).
5. Contreras, se localiza al poniente del cauce del río, aproximadamente a 5 km de La Garrida.

6. La Calera, se encuentra a 300 m de la carretera federal Irapuato-León, a 5 km aproximadamente del cauce del río.
7. El Gato, se localiza a 5 km de la carretera a la Piedad Michoacán, al final del tramo en estudio



*fig. 10 Banco Aldama*

#### **II.4.1.2.- Métodos de Penetración Estándar.**

El método de penetración estándar es uno de los más utilizados debido a que rinde mejores resultados en la práctica y proporcionan información en torno al subsuelo. En los suelos friccionantes, esta prueba permite conocer la compacidad de los mantos, que es la característica fundamental respecto a su comportamiento mecánico. En los suelos plásticos la prueba permite adquirir una idea somera de la resistencia a la compresión simple. Además el método lleva implícito un muestreo que proporciona muestras alteradas representativas del suelo en estudio. En la tabla 4, se presenta el uso más difundido del penetrómetro estándar.

Tabla 4 Uso del Penetrómetro Estándar.

| PENETRÓMETRO  | APLICACIÓN EN EL SUELO |               |                | SE OBTIENE   | OPERACION   | COMENTARIOS   |
|---|------------------------|---------------|----------------|--|---|---|
|   | Recomendable           | Aceptable     | Inaceptable    |  |   |   |
| Penetrómetro estándar 51 cm de diámetro exterior y 36 cm de diámetro interior (SPT) | Arena y Arcilla dura   | Arcilla mediz | Arcilla blanda | Muestras alteradas de cualquier profundidad y el número de golpes necesarios para hincarlo | Se hinca a percusión con el impacto de una masa de 67 Kg dejada caer de 76 cm de altura Se cuenta el número de golpes para hincarlo 30 cm despues de haber penetrado 15cm | Es una prueba de poca precision, pero es probablemente la mas utilizada porque se tienen numerosas correlaciones con las propiedades y comportamiento de los suelos |

El equipo para esta prueba consta de un muestreador especial de dimensiones establecidas (fig.11). Consiste en un tubo de pared gruesa partido longitudinalmente, con una zapata de acero endurecido y una cabeza que lo une al extremo inferior de la columna de barras de perforación con que se hinca; la cabeza tiene un conducto para la salida de azolves a través de una válvula esférica o una válvula de varilla. Opcionalmente se utiliza una trampa de paso para retener las muestras.

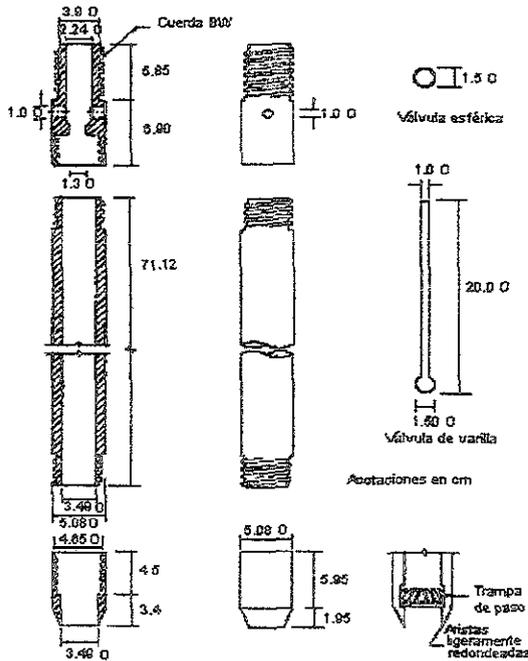


fig. 11 Penetrómetro Estándar.

El penetrómetro se enrosca al extremo de la tubería de perforación y la prueba consiste en hacerlo penetrar a golpes dados por un martinete de 67 kg con guía de caída libre de  $75 \pm 1$  cm (fig.12), contando el número de golpes necesarios para lograr una penetración de 30 cm. El martinete, hueco y guiado por la misma tubería de perforación, es elevado por un cable que pasa por la polea trípode y dejado caer desde la altura requerida contra un ensanchamiento de la misma tubería de perforación hecho al efecto. En cada avance de 60 cm debe retirarse el penetrómetro, removiéndolo al suelo de su interior, el cual constituye la muestra.

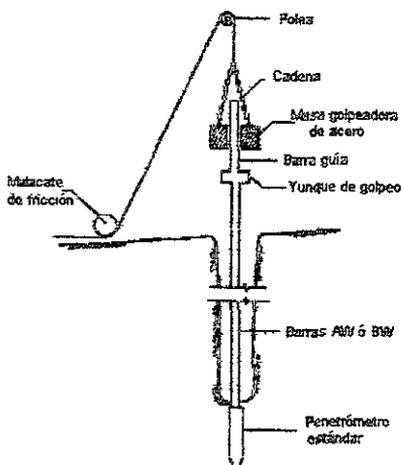


fig.12 Prueba de Penetración Estándar.

Después del hincado se saca el penetrómetro a la superficie para recuperar la muestra alterada, que se coloca en un frasco hermético, y se registra la información del hincado y clasificación del suelo. Los resultados obtenidos que se pueden lograr con este penetrómetro son:

- Definir la estratigrafía del sitio, que se determina a partir del número de golpes  $N$  necesarios para hincar el penetrómetro a 30 cm, o el obtenido por extrapolación en los casos en que no penetre los 45 cm especificados, y de la clasificación de campo de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

- Determinar por correlación la compacidad relativa de suelos granulares y la consistencia de suelos cohesivos. La correlación empírica entre el número de golpes N y la compacidad presentada en la tabla 5, establecida por Terzaghi y Peck<sup>4</sup>, es válida para arenas localizadas arriba del nivel freático.

Tabla 5 Correlación de Golpes-Compacidad Relativa.

| Número de golpes | Compacidad Relativa |
|------------------|---------------------|
| 0 - 4            | Muy suelta          |
| 4 - 10           | Suelta              |
| 10- 30           | Media               |
| 30 - 50          | Densa               |
| > 50             | Muy densa           |

La barra para el hincado utilizada en el estudio fue BW, su movimiento en el sondeo fue lento para evitar que se generará succión. La tabla 6 muestra las barras más usadas.

Tabla 6 Medidas de las Barras de Perforación mas Usuales.

| Barra | $\phi_e$ |      | $\phi_i$ |      | $\phi_c$ |      | Peso en kg/m | cuerdas por pulgada |
|-------|----------|------|----------|------|----------|------|--------------|---------------------|
|       | pulg     | mm   | pulg     | mm   | pulg     | mm   |              |                     |
| EW    | 1 3/32   | 34.9 | 7/8      | 22.2 | 7/16     | 12.7 | 4.6          | 3                   |
| AW    | 1 23/32  | 44.4 | 1 7/32   | 30.9 | 5/8      | 15.9 | 6.5          | 3                   |
| BW    | 2 1/8    | 54.0 | 1 3/4    | 44.5 | 3/4      | 19.0 | 6.2          | 3                   |
| NW    | 2 5/8    | 66.7 | 2 1/4    | 57.2 | 1 3/8    | 34.9 | 8.0          | 3                   |

Longitud estándar: 3.05 m (10 pies)

$\phi_e$  diámetro exterior

$\phi_i$  diámetro interior

$\phi_c$  diámetro interior del cople

Durante la prueba se encontraron suelos predominantemente cohesivos y de consistencia media a dura ( ver subcapítulo II.6.1.1., sondeos mixtos llevados a cabo), el número de golpes osciló entre 9 y 40.

<sup>4</sup> Terzaghi, K. and Peck, R. B. Soil Mechanics in Engineering Handbook. Edit. John Wiley and Sons 1968.

### II.4.1.3.- Métodos con Tubo de Pared Delgada.

El tubo de pared delgada (*tubo Shelby*), se utiliza para el muestreo inalterado de suelos blandos a semiduros localizados arriba y abajo del nivel freático; tiene de 7.5 a 10 cm de diámetro y se hinca a presión.

El muestreador se hinca con un sólo movimiento a una longitud igual a la del tubo menos 15 cm, para dejar espacio a los azolves; la velocidad de hincado debe ser entre 15 y 30 cm/s. Después se deja en reposo 0.5 min, para permitir que la muestra se expanda y se adhiera al muestreador; posteriormente se gira para cortar la base y después se extrae a la superficie y se mide la longitud de la muestra recuperada. Un criterio para determinar calidad de las muestras obtenidas en campo se indica en la tabla 7.

Tabla 7 Recuperación de Muestras.

| Recuperación, % | Calidad     |
|-----------------|-------------|
| Rec= 100        | Excelente   |
| Rec= 80         | Buena       |
| 50 < Rec < 80   | Malta       |
| Rec < 50        | Inaceptable |

donde:

$$\text{Rec} = \frac{L}{H} \times 100$$

Rec: recuperación.

L: longitud recuperada.

H: Longitud muestreada.

En el laboratorio, la calidad de las muestras se define observando cortes longitudinales para identificar la alteración que pudieran mostrar lentes delgados de algún material o bien, observando el proceso de secado lento de placas delgadas de suelo cortadas longitudinalmente.

#### II.4.1.4.- Métodos de Sondeo Mixto.

Un sondeo mixto es la combinación de los métodos penetración estándar y obtención de muestras a través del tubo de pared delgada (*tubo Shelby*). Para efectuar los trabajos de exploración semiprofunda para el proyecto se utilizó este método a lo largo del cauce. Se ejecutaron seis sondeos a 12 m de profundidad. La tabla 8 indica la localización de cada uno de los sondeos mixtos realizados y en la figura 11, se ubican en planta.

Tabla 8. Sondeos Mixtos Realizados.

| Sondeo | Profundidad (m) | Kilómetro            |
|--------|-----------------|----------------------|
| SM-1   | 12.00           | En la falla (11+100) |
| SM-2   | 12.00           | En la falla (11+300) |
| SM-3   | 12.00           | 2+800                |
| SM-4   | 12.00           | 6+100                |
| SM-5   | 12.00           | 8+750                |
| SM-6   | 12.00           | 6+850                |

Las muestras obtenidas en los sondeos fueron identificadas en campo y debidamente empacadas y protegidas contra los cambios de humedad, se trasladaron al laboratorio para su análisis.

#### II.5.- DETERMINACION DE PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS EN CAMPO Y LABORATORIO.

Con la información reunida durante la exploración y el reconocimiento geológico se realizaron las pruebas de laboratorio, en las cuales se especifican el tipo, procedimiento y cantidad de ensayos que pueden representar de una manera racional el comportamiento del subsuelo ante las sollicitaciones de carga.

### **II.5.1.- Descripción de las Pruebas Realizadas.**

A partir de los sondeos con muestreo alterado e inalterado y con objeto de clasificar los materiales que conforman el subsuelo, se determina la variación con la profundidad de las siguientes propiedades:

#### **II.5.1.1.- Propiedades Índice.**

Suelos finos y granulares.

- Determinación de límites de consistencia.
- Contenido natural de agua.
- Pérdida por lavado, % de finos.
- Análisis granulométrico.
- Clasificación de suelos según SUCS.

Una breve descripción de estas pruebas significativas se presenta a continuación:

#### **Límites de consistencia.**

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada, depende en gran parte de la humedad. Así pues, el comportamiento mecánico del suelo es función del contenido de agua que tiene; en términos generales el suelo fino con mayor contenido de agua es más deformable y menos resistente.

La plasticidad es otra de las características del suelo fino que se modifica con el contenido de agua; la plasticidad es la propiedad de un material de deformarse sin cambiar el volumen ni agrietarse o desmoronarse; la magnitud de deformación no es directamente proporcional al esfuerzo que recibe, permaneciendo el suelo al reducirse el esfuerzo.

La relación entre la plasticidad y el contenido de agua, así como entre éste último y las características mecánicas del suelo, permite usar la plasticidad como una medida de las condiciones de trabajabilidad del suelo.

Arbitrariamente, A. Atterberg propuso estados de consistencia o de firmeza que pueden presentar los suelos finos (arcillas y limos) al variar el contenido de agua. De acuerdo con su contenido de agua, los suelos pueden estar en alguno de los siguientes estados de consistencia:

1. Estado líquido, es el que presentan los suelos cuando manifiestan las propiedades de una suspensión.
2. Estado plástico, es cuando el suelo se comporta plásticamente.
3. Estado semisólido, en el que la apariencia de los suelos es la de un sólido; sin embargo, al secarse disminuye de volumen.
4. Estado sólido, es cuando el volumen de los suelos no varía aun cuando se le someta a secado.

La variación cualitativa de la consistencia del suelo con el contenido de agua, se muestra en la figura 12, en ella también se ha dibujado cualitativamente la relación entre el contenido de agua y la resistencia del suelo, resistencia que puede ser a las deformaciones o a los esfuerzos.

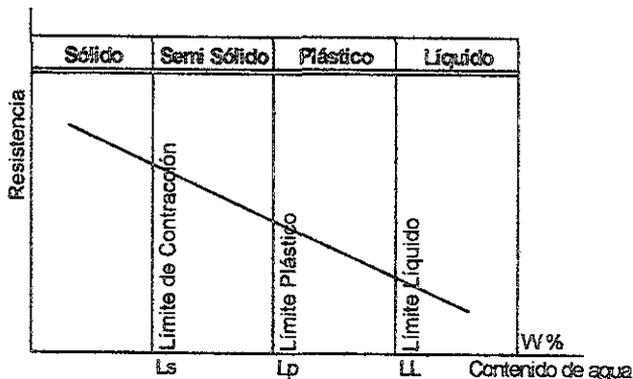


fig.13 Estados de Consistencia

donde:

Resistencia: Medida de la capacidad de soportar deformaciones o esfuerzos.

W %: Contenido de agua.

Las fronteras entre los estados de consistencia mencionados, fueron establecidos por Atterberg bajo el nombre general de "*Limites de Consistencia*", los cuales se indican a continuación:

1. Límite líquido ( $L_L$ ). Es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados líquido y el plástico.
2. Límite plástico ( $L_P$ ). Es el contenido de agua que marca el paso del estado plástico al semisólido.
3. Límite de contracción ( $L_S$ ). Lindero entre el estado semisólido y el sólido.

Estos límites son empleados para clasificar los suelos finos y estimar la calidad de sus propiedades mecánicas y así prever su posible comportamiento. Con la carta de la plasticidad se clasifican los suelos finos en función del límite líquido y el índice plástico.

#### Contenido natural de agua.

El contenido natural de agua de un suelo es la relación expresada en por ciento, entre el peso del agua que tiene el suelo y el peso de sus partículas sólidas. Este último peso se obtiene al secar el espécimen a 105°C durante 24 horas. Esta temperatura se ha fijado para normar la cantidad de agua que debe extraerse del suelo, pero no significa que el agua así medida sea toda la que se encuentra en el material.

El contenido de agua es una de las relaciones gravimétricas de los suelos de más fácil obtención y se expresa en por ciento de la siguiente forma:

$$W \% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

donde:

$W$  = Contenido de agua

$W_w$  = Peso del agua

$W_s$  = Peso del suelo seco

Este parámetro permite prever el posible comportamiento mecánico del suelo en forma cualitativa; es decir, estimar aproximadamente la resistencia al corte y la deformabilidad del material.

#### Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas del suelo, pasándolo a través de una sucesión de mallas de aberturas cuadradas y en pesar las porciones que se retienen en cada una de ellas, expresando dichos retenidos como porcentajes en peso de la muestra total. La siguiente tabla muestra el número de las mallas con su abertura correspondiente.

Tabla 9

| Malla | Abertura en (mm) |
|-------|------------------|
| 4     | 4.76             |
| 10    | 2.00             |
| 20    | 0.84             |
| 40    | 0.42             |
| 60    | 0.25             |
| 100   | 0.149            |
| 200   | 0.074            |

La representación más usual del análisis granulométrico es en gráficas originando curvas que llegan a tener cualquier forma, el eje de las abscisas es en escala logarítmica en el cual se representa el tamaño del diámetro de las partículas y en el eje de las ordenadas, el porcentaje en peso de los granos menores que el tamaño indicado por la abscisa.

Para interpretar la forma geométrica de la curva de granulométrica se definen los conceptos de suelo bien graduado o suelo mal graduado.

*Suelo bien graduado.* Cuando la curva granulométrica es continua, tendida con una inclinación de 0 a 40 grados y la variación de los tamaños es completo sin que falte ningún diámetro intermedio.

*Suelo mal graduado.* Cuando la curva no es tendida (tiene fuertes pendientes), su inclinación es mayor a 40 grados y se asemeja a una línea recta; por consiguiente faltan tamaños intermedios.

Para fijar lo bien o mal graduado del suelo se utiliza el coeficiente de uniformidad  $C_U$  que se define como la relación de diámetros correspondientes al 60% que pasa y al 10% que pasa según la curva granulométrica. Por último se tiene el coeficiente de curvatura  $C_C$ , que es la relación del cuadrado del diámetro correspondiente al 30% que pasa, entre el producto  $D_{60}$  por  $D_{10}$ , los coeficientes mencionados se resumen de la siguiente forma:

| <i>Expresión</i>                         | <i>Suelo bien graduado</i>   | <i>Suelo mal graduado</i>    |
|--|------------------------------|------------------------------|
| $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$            | > 6 > 4<br>(arenas) (gravas) | < 6 < 4<br>(arenas) (gravas) |
| $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$ | 1 < $C_C$ < 3                | 3 < $C_C$ < 1                |

#### **Clasificación de suelos.**

El Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), se basa en el reconocimiento del tipo y predominio de la plasticidad y compresibilidad. Esta clasificación divide a los suelos en tres grupos principales: suelos gruesos, suelos finos, y suelos de alto contenido de materia orgánica (turba). En el campo, su identificación se lleva a cabo por medio de inspección visual para los granos gruesos y por medio de pruebas manuales sencillas para la parte fina de los suelos o para los suelos finos. En el laboratorio, puede hacerse uso de la curva granulométrica y de los límites de Atterberg. Los suelos turbosos son identificado inmediatamente por su color, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa.

a) *Clasificación de campo.*

En el campo se determina de un modo aproximado el material que es retenido en la malla No. 200, las partículas más pequeñas apreciables a simple vista; este material es el grueso y se subdivide en arena y grava dependiendo de que más de la mitad de él pase por la malla No. 4, el que no pase es grava.

El sistema SUCS, necesita para la clasificación de los suelos finos en el campo la obtención de la dilatancia, resistencia en estado seco y la tenacidad del suelo que se analiza.

La *dilatancia* se obtiene preparando la muestra con la parte del suelo que pasa la malla No. 40, en un volumen de 10 cm<sup>3</sup> agregando el agua necesaria para que el suelo este suave pero no pegajoso, la pastilla así formada se coloca en la palma de la mano y se golpea de canto con la otra, procurando que salga agua a la superficie de la pastilla; el valor de la reacción del suelo al golpe es su dilatancia, e indicará la clase de suelo de que se trate dependiendo de que la dilatancia sea rápida, lenta muy lenta o nula, la clasificación se obtiene de la carta del SUCS.

La *resistencia en estado seco* se realiza también con material que ha pasado la malla No.40, moldeándolo con agua hasta formar una masilla que se deja secar al sol, cuando esta interiormente seca, se rompe y desmorona entre los dedos; la resistencia nula indicará que el material es un limo de baja plasticidad, si es muy alta será una arcilla de alta plasticidad. La resistencia varía de nula a ligera, de ligera a media, de media a alta y de alta a muy alta.

La *tenacidad* se determina en una pastilla de suelo que ha pasado la malla No. 40, con la cantidad de agua suficiente para que al formar cilindros de 3 mm de diámetro este se agriete (como el límite plástico), con esta humedad se amasa nuevamente y se repite el procedimiento formando cilindros hasta llegar al agrietamiento; se ejecuta nuevamente la operación tantas veces sea necesario hasta que no se puedan formar cilindros.

La tenacidad varía de nula - ligera - media y alta, en la carta del SUCS se observa la clasificación de un suelo dependiendo de la tenacidad que el material tenga.

*b) Clasificación de laboratorio.*

El SUCS, ha tenido en cuenta la manera de clasificar con precisión a un suelo por medio de pruebas de laboratorio, que consisten en análisis mecánicos y determinación de los límites de Atterberg. Las clasificaciones de laboratorio a menudo se efectúan sobre una muestra representativa de suelos que han sido sujetas a pruebas de resistencia al esfuerzo cortante, compresibilidad y permeabilidad.

**II.5.1.2.- Propiedades Mecánicas.**

Para determinar las propiedades mecánicas de los materiales encontrados durante la exploración se realizaron las siguientes pruebas (en muestras inalteradas):

*Suelos finos y gruesos*

- Peso volumétrico.

En las pruebas siguientes es de suma importancia definir en que muestras se efectúan los ensayos, así como la secuencia de cargas aplicadas.

- Compresión triaxial no consolidada, no drenada.
- Compresión triaxial consolidada drenada
- Consolidación unidimensional.

Muestras integrales, que generalmente proceden de bancos de materiales, además de los ensayos índice ya mencionados.

- Compactación proctor.
- Densidad de sólidos.

La descripción de estas pruebas se presenta en seguida:

#### **Peso volumétrico.**

El peso volumétrico de una muestra de suelo se define como la relación entre el peso de la muestra del suelo y el volumen de ella, el cual se obtiene con la siguiente relación:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

#### **Pruebas de compresión triaxial.**

Las pruebas de compresión triaxial se realizan con el propósito de determinar las características de esfuerzo-deformación y resistencia de los suelos sujetos a esfuerzos cortantes, producidos cuando varían los esfuerzos principales que actúan sobre un espécimen cilíndrico del suelo que se trate. En los tipos más usuales del aparato de prueba, dos de los esfuerzos principales se producen por la presión de un líquido que rodea el espécimen y, por lo tanto, son iguales.

El esquema del conjunto para realizar esta prueba se aprecia en la figura 14, el cual consta de la llamada cámara de compresión triaxial constituida por un cilindro de lucita, de unos 10 cm de diámetro exterior y unos 6 mm de espesor de pared. La base de la cámara son dos placas redondas de acero al cadmio (o su equivalente), selladas respecto al cilindro de lucita perfectamente, por medio de goma o hule. Esta cámara es resistente a presiones internas hasta valores de alrededor de 7 kg/cm<sup>2</sup>, con un generoso factor de seguridad, en caso de ser mayor las presiones internas, la cámara deberá protegerse con anillos de latón o con malla metálica; con estas protecciones pueden manejarse presiones hasta 10 kg/cm<sup>2</sup>.

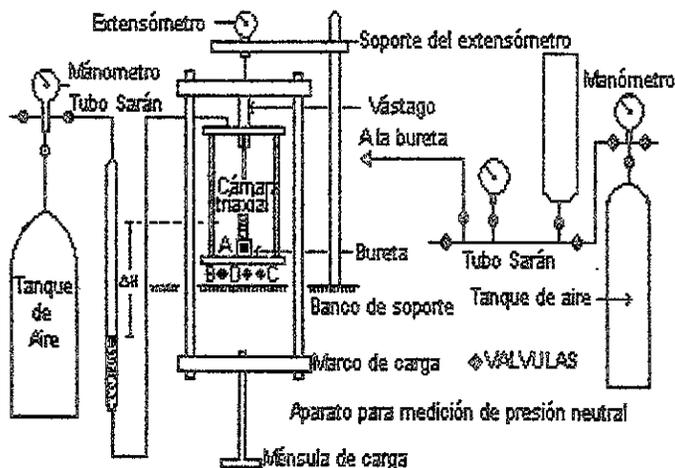


fig.14 Conjunto del Dispositivo Para Pruebas de Compresión Triaxial.

### Consolidación unidimensional.

Los materiales que se utilizan en ingeniería, al aplicarles fuerzas exteriores, sufren deformaciones de acuerdo con una determinada relación esfuerzo-deformación. A un suelo saturado al que se le aplican fuerzas exteriores se le provoca una deformación, pero ésta no es instantánea. En este caso, se produce un retraso de la deformación con respecto al esfuerzo, por lo que se tiene una relación esfuerzo-deformación-tiempo.

Cuando un suelo saturado se somete a un incremento de carga, la acción de ésta se transmite en un principio al agua que llena los poros del material por ser el líquido incompresible, comparado con la estructura que forman las partículas sólidas del suelo. Debido a la presión que de este modo se induce en el agua, ésta fluye hacia las fronteras en las cuales dicha presión se disipa, produciéndose variaciones en el volumen del material y la transferencia de la carga a la estructura sólida. La velocidad con que se produce este fenómeno, conocido como consolidación, depende de la permeabilidad del suelo, al igual que otras condiciones geométricas y de frontera (drenes).

La prueba de consolidación consiste en comprimir verticalmente un espécimen del material que se estudia, confinado en un anillo rígido, siguiendo una secuela de cargas establecidas de antemano. En todos los casos y para cada incremento de carga, el espécimen sufre una primera deformación correspondiente al retraso hidrodinámico que se llama consolidación primaria, y también sufre una deformación adicional, debida a un fenómeno secundario, que en las arcillas se conoce como retraso plástico y en las arenas retraso friccional. En general, el suelo se deformará siempre una cantidad mayor que la correspondiente al retraso hidrodinámico exclusivamente. Sin embargo, el retraso hidrodinámico es el único que toma en cuenta en la teoría de la consolidación.

#### **Compactación proctor.**

Se entiende por compactación de los suelos a todo proceso que aumente el peso volumétrico de un materia. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable.

La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión en tres capas, dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada. El molde es un cilindro de 0.94 lts de capacidad aproximadamente ( $1/30 \text{ ft}^3$ ), de 10.2 cm de diámetro y 11.7 cm de altura, provisto de una extensión desmontable de igual diámetro y de 5 cm de altura. El molde puede fijarse a una base metálica con tornillos de mariposa. El pisón es de 2.5 kg de peso y consta de un vástago en cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm de diámetro. Los golpes se aplican dejando caer el pisón desde una altura de 30.5 cm. Dentro del molde el suelo debe colocarse tres capas que se compactan dando 25 golpes, repartidos en el área del cilindro, a cada una de ellas.

Con los datos anteriores la energía específica de compactación es de 6 kg cm/cm<sup>3</sup>, calculada con la fórmula:

$$E_e = \frac{NnWh}{V}$$

En donde :

$E_e$  = Energía específica.

$N$  = Número de golpes por capa.

$n$  = Número de capas de suelo.

$W$  = Peso del pisón.

$h$  = Altura de caída libre del pisón.

$V$  = Volumen del suelo compactado.

#### Densidad de sólidos.

La densidad de un suelo es la relación entre el peso de los sólidos y el peso del volumen de agua que desalojan. La densidad de los suelos varía comúnmente entre los siguientes valores:

|   |             |
|---|-------------|
| Cenizas volcánicas.....                               | 2.20 a 2.50 |
| Suelos orgánicos.....                                 | 2.50 a 2.65 |
| Arenas y gravas.....                                  | 2.65 a 2.67 |
| Limos orgánicos y guijarros arcillosos.....           | 2.67 a 2.72 |
| Arcillas poco plásticas y medianamente plásticas..... | 2.72 a 2.78 |
| Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas.....  | 2.78 a 2.84 |
| Arcillas expansivas.....                              | 2.84 a 2.88 |

#### II.5.2.- Designación de Ensayes Tanto en el Cauce Como en Bancos de Materiales.

Los ensayes de laboratorio efectuados a las muestras obtenidas siguieron los lineamientos establecidos en el instructivo para ensayes de suelos, editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Para el proyecto se realizaron las siguientes pruebas.

*En bancos para terraplén:*

- Granulometría por mallas.
- Contenido natural de agua.
- Límites de consistencia.
- Compactación proctor.
- Densidad de sólidos.
- Compresión triaxial no consolidada - no drenada, en suelos finos, saturada al 100% con esfuerzos confinantes de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>.
- Compresión triaxial consolidada drenada (en suelos friccionantes), se ensaya 4 probetas con diámetro de 15 cm mínimo, elaboradas al 100% de la densidad relativa, el grado de saturación fue del 100% y los esfuerzos confinantes de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>.
- Consolidación unidimensional.

*En bancos para revestimiento de caminos:*

- Granulometría por mallas.
- Límites de consistencia.
- Compactación proctor.
- Densidad de sólidos.

*En el trazo del proyecto para el encauzamiento (procedencia de pozos a cielo abierto):*

## Muestras alteradas:

- Contenido Natural de Agua.
- Clasificación visual y tacto.
- Determinación del contenido de finos por lavado.
- Límites de consistencia.

**Muestras inalteradas:**

- Peso volumétrico natural.
- Consolidación unidimensional (saturación inicial o saturación en el último incremento de carga de  $4 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Compresión triaxial no consolidada - no drenada, realizada en 4 probetas, saturada al 100% con esfuerzos confinantes de 0.5, 1.0, 1.5 y  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .
- Densidad de sólidos.

*En los sondeos mixtos:***Muestras alteradas:**

- Contenido natural de agua.
- Clasificación visual y tacto.
- Determinación del contenido de finos por lavado.
- Límites de consistencia.

**Muestras inalteradas:**

- Peso volumétrico natural.
- Consolidación unidimensional (saturación inicial o saturación en el último incremento de carga de  $4 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Compresión triaxial no consolidada - no drenada, realizada en 4 probetas, saturada al 100% con esfuerzos confinantes de 0.5, 1.0, 1.5 y  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .
- Densidad de sólidos.

Los resultados obtenidos en las pruebas a lo largo del cauce y en los bancos de materiales se presentan en el subcapítulo II.6.1.1.

## II.6.- PRESENTACION DE RESULTADOS.

### II.6.1.- Estratigrafía y Propiedades.

Las condiciones estratigráficas en el subsuelo son poco variables a lo largo del cauce, lo que es típico en suelos transportados y residuales.

Los resultados de las pruebas realizadas se exponen en los siguientes apartados, pero en general se detectó que hasta la profundidad explorada predominan los suelos limo arenosos y arcillas limosas en la formación de los bordos del cauce.

Con ayuda de los sondeos mixtos y de muestreo selectivo realizados, además de las observaciones directas en campo se determinó la inactividad de la falla geológica presentada en el kilómetro 10+776 del cauce, sin embargo conviene confirmar esta hipótesis mediante la ejecución de un estudio geofísico en el sitio.

En lo referente a los bancos de materiales localizados, se presentan las propiedades del material para cada banco, así como la evaluación de calidad

#### II.6.1.1.- En el Cauce.

En las siguientes tablas se presenta la estratigrafía y propiedades relevantes de las secciones críticas o de interés especial en el cauce.

## SECCION "C"

| Pozo a cielo abierto 1 |   |
|------------------------|---|
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 1.00            | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 6 %  |
| 1.00 - 2.00            | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 7 %<br>Indices de plasticidad LL = 25.2 %, LP = NP, IP = NP*<br>Porcentaje de material fino por lavado 41 %<br>Densidad de sólidos 2.61              |
| 2.00 - 3.00            | Limo arenoso color café claro<br>Contenido natural de agua promedio es de 8 %<br>Indices de plasticidad LL = 30.5 % LP = NP IP = NP<br>Porcentaje de material fino por lavado 71 %  |
| Pozo a cielo abierto 2 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 1.00            | Arcilla plástica color negro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 27 %  |
| 1.00 - 3.00            | Arcilla arenosa color gris claro con gravillas,<br>Contenido natural de agua promedio es de 25 %<br>Indices de plasticidad LL = 73 %, LP = 33.4 IP = 39.5<br>Porcentaje de material fino por lavado 86.4 %<br>Clasificación: ML |
| Pozo a cielo abierto 3 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 1.00            | Arcilla plástica color negro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 40 %<br>Indices de plasticidad LL = 65 %, LP = 25.24 %, IP = 39.76 %<br>Porcentaje de material fino 75 %<br>Clasificación: CH                         |
| 1.00 - 2.00            | Arcilla color café claro con gravillas,<br>Contenido natural de agua promedio es de 42 %  |
| 2.00 - 3.00            | Arcilla limosa color café claro con gravillas,<br>Contenido natural de agua promedio es de 45 %   |

| Pozo a cielo abierto 4  |  |
|---|--|
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00   | Limo arenoso color café claro con materia orgánica,<br>Contenido natural de agua promedio es de 7.6 %<br>Indices de plasticidad LL = 29 % LP = 28.72 e IP = 0.28 %<br>Material fino por lavado = 82 %<br>Clasificación: ML |
| Pozo a cielo abierto 5  |  |
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 2.00   | Arcilla limosa color café oscuro con arena y materia orgánica<br>Contenido natural de agua promedio es de 26.3 %<br>Indices de plasticidad: LL = 43.84 % LP = 24.49 % IP = 19.35 %<br>Clasificación: CL                    |
| 2.00 - 3.00   | Arcilla limosa color café claro con arena fina,<br>Contenido natural de agua promedio es de 4.8 %<br>Porcentaje de material fino: 24.1 %   |
| Pozo a cielo abierto 6  |  |
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 3.00   | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 7 %<br>Indices de plasticidad LL de 31 a 36 % LP = NP, IP = NP<br>Peso volumétrico natural 1.36 t/m <sup>3</sup><br>Clasificación: ML           |
| <p>El promedio del ángulo de fricción, la cohesión y el peso saturado del material fue de:</p> <p><math>\phi = 14^\circ</math></p> <p><math>c = 2.6 \text{ t/m}^2</math></p> <p><math>\gamma_{\text{sat}} = 1.56 \text{ t/m}^3</math></p> |  |

\*NP: No Presento

## SECCION "F"

| Pozo a ciclo abierto 1 |  |
|------------------------|--|
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 3.00            | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 6 %<br>Indices de plasticidad: LL de 28 a 30% LP = NP IP = NP<br>Porcentaje de material fino de 64 a 66 %<br>Densidad de sólidos Ss = 2.51<br>Clasificación: ML                       |
| Pozo a ciclo abierto 2 |  |
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 3.00            | Limo arenoso color café claro con materia orgánica,<br>Contenido natural de agua promedio es de 2 %<br>Indices de plasticidad: LL = 23.68 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino de 75 a 79 %<br>Clasificación: ML                                      |
| Pozo a ciclo abierto 3 |  |
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 3.00            | Limo arenoso color café claro con materia orgánica<br>Contenido natural de agua promedio es de 6 %<br>Indices de plasticidad: LL = 42.8 %, LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino: 26 %<br>Clasificación: ML  |
| Pozo a ciclo abierto 4 |  |
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 3.00            | Arena limosa color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 5 %<br>Indices de plasticidad: LL = 28.4 a 30 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino: de 28 a 30 %<br>Peso volumétrico natural: 1.42 t/m <sup>3</sup> .<br>Clasificación: ML |

| Pozo a cielo abierto 5  |  |
|---|--|
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00   | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 6 %<br>Indices de plasticidad: LL de 20 a 29 %, LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 54 %<br>Peso volumétrico natural 1.16 t/m <sup>3</sup> .<br>Clasificación: ML       |
| Pozo a cielo abierto 6  |  |
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00   | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 6 %<br>Indices de plasticidad LL de 22 a 29 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino de 46 a 72 %<br>Peso volumétrico natural 1.18 t/m <sup>3</sup> .<br>Clasificación: ML |
| <p>El promedio del ángulo de fricción, la cohesión y el peso saturado del material fue de:</p> <p><math>\phi = 13^\circ</math></p> <p><math>c = 1.6 \text{ t/m}^2</math></p> <p><math>\gamma_{\text{sat}} = 1.73 \text{ t/m}^3</math></p> |  |

## SECCION "I"

| Pozo a cielo abierto 1 |   |
|------------------------|---|
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 0.50            | Arcilla plástica color café oscuro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 15 %  |
| 0.50 - 2.00            | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 12 %<br>Indices de plasticidad LL = 24.7 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 87.4 %<br>Clasificación: ML   |
| 2.00 - 3.00            | Limo arenoso color café claro<br>Contenido natural de agua promedio es de 14 %<br>Indices de plasticidad LL = 35 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 81 %<br>Clasificación: ML  |
| Pozo a cielo abierto 2 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 1.00            | Limo arenoso color café claro.  |
| 1.00 - 3.00            | Arcilla limosa color café oscuro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 18 %<br>Indices de plasticidad LL = 66.3 % LP = 28.89 % IP = 37.41 %<br>Contenido de material fino 63 %<br>Densidad de sólidos: 2.7<br>Peso volumétrico natural:<br>Clasificación: CH |

| Pozo a cielo abierto 3  |  |
|---|--|
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 2.00   | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 12 %<br>Indices de plasticidad: LL = 32 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 80 %<br>Clasificación: ML     |
| 2.00 - 3.00   | Arcilla limosa color café oscuro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 18 %<br>Indices de plasticidad: LL = 43 %, LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 94 %<br>Clasificación: ML |
| Pozo a cielo abierto 4  |  |
| Profundidad   | Descripción  |
| 0.00 - 1.50   | Limo arenoso color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 13 %  |
| 1.50 - 3.00   | Arcilla limosa color café claro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 17 %  |
| <p>El promedio del ángulo de fricción, la cohesión y el peso saturado del material fue de:</p> <p><math>\phi = 18^\circ</math></p> <p><math>c = 1.6 \text{ t/m}^2</math></p> <p><math>\gamma_{\text{sat}} = 1.65 \text{ t/m}^3</math></p> |  |

## SECCION "J"

| Pozo a cielo abierto 1 |   |
|------------------------|---|
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 1.50            | Limo arenoso color café oscuro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 9 %<br>Indices de plasticidad: LL = 35.6 %, LP = NP, IP = NP  |
| 1.50 - 3.00            | Arcilla limosa color café oscuro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 20 %<br>Indices de plasticidad: LL = 51.23 % LP = 24.27 % IP = 27.03 %<br>Contenido de material fino de 53 a 90 %<br>Clasificación: CH              |
| Pozo a cielo abierto 2 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 3.00            | Arcilla limosa color café claro<br>Contenido natural de agua promedio es de 15 %<br>Indices de plasticidad: LL = 36.8 % LP = NP IP = NP<br>LL = 87 % LP = NP IP = NP<br>Contenido de material fino 92 %<br>Clasificación: CL y CH |
| Pozo a cielo abierto 3 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 2.00            | Limo arenoso color café claro con materia orgánica,<br>Contenido natural de agua promedio es de 13 %<br>Indices de plasticidad: LL = 38.5 % LP = 19.96 % IP = 18.54<br>Contenido de material fino 77 %<br>Clasificación: CL       |
| 2.00 - 3.00            | Arcilla limosa color negro,<br>Contenido natural de agua promedio es de 15 %  |

El promedio del ángulo de fricción, la cohesión y el peso saturado del material fue de:

$$\phi = 21^\circ$$

$$c = 13.7 \text{ t/m}^2$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 1.6 \text{ t/m}^3$$

### SECCION "L"

#### Pozo a cielo abierto 1

| Profundidad | Descripción  |
|-------------|--|
| 0.00 - 3.00 | Limo arenoso color café claro.<br>Contenido natural de agua promedio es de 9 %.<br>Indices de plasticidad LL de 36.5 a 35.5 % LP = NP, IP = NP<br>Contenido de material fino varía de 46 a 84.1 %<br>clasificación: ML |

El promedio del ángulo de fricción, la cohesión y el peso saturado del material fue de:

$$\phi = 15^\circ$$

$$c = 1.3 \text{ t/m}^2$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 1.6 \text{ t/m}^3$$

Las siguientes tablas reportan el resultado obtenido en los sondeos mixtos llevados a cabo en zonas criticas de interés:

| Sondeo mixto 1 (SM-1) |  |
|-----------------------|--|
| Profundidad           | Descripción  |
| 0.00 - 3.00           | Limo arenoso color café claro de compacidad suelta, el contenido natural de agua promedio es de 12 %, el porcentaje de material fino es de 52.78 %   |
| 3.00 - 6.00           | Arcilla color café oscuro de consistencia media a dura, el contenido natural de agua promedio es de 18 %, los índices de plasticidad son: LL de 47 a 66 %, LP de 18.61 a 27.3% e IP de 28.4 a 38.7 %, el porcentaje de material fino varía de 68.5 a 83.5 %, peso volumétrico natural de 1.74 t/m <sup>3</sup> .                               |
| 6.00 - 7.50           | Arcilla limosa color café rosado de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 20 %, los índices de plasticidad son: LL varía de 53 a 42.3 % LP de 23.86 a 22.7% e IP de 29.2 a 19.5 %, el porcentaje de material fino varía de 83.7 a 44.5 %, peso volumétrico natural de 1.71 t/m <sup>3</sup> , densidad de sólidos 2.4 |
| 7.50 - 8.10           | Arcilla color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 24 %  |
| 8.10 - 10.00          | Arena poco limosa color café de compacidad media a densa, el contenido natural de agua 12 %, los índices de plasticidad son LL = 45.2 % IP = 20.0 % e IP = 25.2 %, el contenido de material fino es de 25.2 %  |
| 10.00 - 12.50         | Arcilla poco limosa color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 18 %, el contenido de material fino es de 17.1 %  |

| Sondeo número 1 (SM-2) |  |
|------------------------|--|
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 1.20            | Limo arenoso color café oscuro de compacidad suelta con pedacería de tabique y materia orgánica (cascajo), el contenido natural de agua promedio es de 10 %  |
| 1.20 - 6.00            | Limo arenoso color café claro de compacidad suelta, el contenido natural de agua promedio es de 13 %, el contenido de material fino es de 38.4 %.  |
| 6.00 - 6.60            | Arcilla limosa color café claro de consistencia media, el contenido natural de agua promedio es de 22 %, los índices de plasticidad son LL = 34.5 % LP = 18.8 % e IP = 15.7 % el porcentaje de material fino es de 67.3 %.                               |
| 6.60 - 7.20            | Limo arenoso color café claro de compacidad suelta, el contenido natural de agua promedio es de 22 %   |
| 7.20 - 8.40            | Arcilla limosa color café rosado de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 24 %  |
| 8.40 - 9.50            | Arcilla arenosa color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 10 %, los índices de plasticidad son LL = 57.5 % LP = 39.3 % e IP = 18.1 %, el porcentaje de material fino es de 88.59 % y la densidad de sólidos 2.4 |
| 9.50 - 10.00           | Arena poco limosa color café claro de compacidad densa, el contenido natural de agua promedio es de 8 %  |
| 10.00 - 12.30          | Arcilla limosa color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 20 %, los índices de plasticidad son: LL de 40 a 55.5 % LP de 18.99 a 7.7 % e IP de 21.00 a 47.5 %, el porcentaje de material fino es de 89 %          |

| Sondeo mixto 3 (SM-3) |  |
|-----------------------|--|
| Profundidad           | Descripción  |
| 0.00 - 4.20           | Limo arenoso color café claro de compactidad suelta a media, el contenido natural de agua promedio es de 12 %, el porcentaje de material fino varía de 48.4 a 80.2 %   |
| 4.20 - 5.50           | Arcilla limosa color café oscuro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 22 %, el porcentaje de material fino es de 88.4 %   |
| 5.50 - 6.00           | Limo arenoso color café claro de compactidad media a densa, el contenido natural de agua promedio es de 18 %   |
| 6.00 - 8.60           | Arcilla limosa color café rosado de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 25 %, los índices de plasticidad son: LL varía de 47.8 a 65.3 % LP de 33.8 a 26.6 % e IP de 13.9 a 12.3 %, el porcentaje de material fino varía de 62.9 a 65.3 %, el peso volumétrico es de 1.60 t/m <sup>3</sup> . |
| 8.60 - 10.50          | Arena limosa color café claro de compactidad densa, el contenido natural de agua promedio es de 14 %   |
| 10.50 - 11.80         | Arcilla limosa color café claro de consistencia media, el contenido natural de agua promedio es de 30 %, los índices de plasticidad son LL = 84.20, LP = 33.3 % e IP = 50.9 %  |

| <b>Sondeo mixto 4 (SM-4)</b> |  |
|------------------------------|--|
| <b>Profundidad</b>           | <b>Descripción</b>   |
| 0.00 - 5.80                  | Limo arenoso color café claro de compacidad media, el contenido natural de agua promedio es de 12 %, los índices de plasticidad son LL varió de 25.8 a 55.5, LP = 29.8 e IP = 25.7 %, el porcentaje de material fino de 80 a 45.7 %  |
| 5.80 - 10.90                 | Arcilla limosa color café oscuro de consistencia media a dura, el contenido natural de agua promedio es de 8 %, los índices fueron LL de 32 a 55.5 % LP de 20.2 a 29.8 % e IP de 11.8 a 25.69 %, el porcentaje de material varía de 55.9 a 87.3 %, el peso volumétrico natural es de 1.58 t/m <sup>3</sup> . |
| 10.90 - 11.50                | Arena arcillosa color café grisáceo de compacidad densa a media, el contenido natural de agua promedio es de 15 %  |
| 11.50 - 12.10                | Arcilla limosa color café grisáceo de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 28 %, los índices de plasticidad son LL = 55 %, LP = 33.43 % e IP = 21.6 %, el porcentaje de material fino es de 73.50 %  |

| <b>Sondeo mixto 5 (SM-5)</b> |   |
|------------------------------|---|
| <b>Profundidad</b>           | <b>Descripción</b>  |
| 0.00 - 1.80                  | Arena fina limosa color café claro de compacidad media, el contenido natural de agua promedio es de 8 %.  |
| 1.80 - 3.00                  | Arena limosa fina de compacidad media a suelta con grumos de arcilla color café claro, el contenido natural de agua promedio es de 12 %, el porcentaje de material fino es de 45.6 %  |
| 3.00 - 3.50                  | Arena limosa fina color café amarillento de compacidad suelta, el contenido natural de agua promedio es de 10 %   |
| 3.50 - 7.60                  | Limo arcilloso color café claro de consistencia media a dura, el contenido natural de agua promedio es de 28 %, los índices de plasticidad son: LL de 53 a 42 % LP de 28.8 a 30.8 % e IP de 24.2 a 11.2 %, el porcentaje de material fino varía de 41.7 a 56.6 %, el peso volumétrico natural es de 1.66 t/m <sup>3</sup> . |
| 7.60 - 10.00                 | Arena mediana color café grisáceo de compacidad densa, el contenido natural de agua promedio 8 %, los índices de plasticidad son LL = 46.5, LP = 25.5 % e IP = 21.00 %.   |
| 10.00 - 11.70                | Limo arcilloso color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 25 %, los índices de plasticidad son LL = 45 % LP = 18.4 % e IP = 26.6 %, el porcentaje de material fino es de 82.4 %, el peso volumétrico 1.65 t/m <sup>3</sup> , la densidad de sólidos 2.53                            |

| Sondeo mixto 6 (SM-6) |  |
|-----------------------|--|
| Profundidad           | Descripción  |
| 0.00 - 0.60           | Arena fina limosa color café oscuro de compacidad media, el contenido natural de agua promedio es de 18  |
| 0.60 - 1.80           | Limo arenoso color café amarillento de compacidad densa, el contenido natural de agua promedio es de 12 %, el porcentaje de material fino es de 63.1 %   |
| 1.80 - 2.40           | Arcilla plástica color café oscuro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 15 %, los índices de plasticidad son LL = 21.8 %, LP = NP, IP = NP  |
| 2.40 - 3.00           | Limo arenoso color café claro de compacidad media, el contenido natural de agua promedio es de 15 %  |
| 3.00 - 3.60           | Arcilla limosa color café claro de consistencia dura, con poca arena fina, el contenido natural de agua promedio es de 18 %, el porcentaje de material fino es de 65.9 %   |
| 3.60 - 5.40           | Arena gruesa color café claro de compacidad media, el contenido natural de agua promedio es de 8 %   |
| 5.40 - 6.50           | Arcilla color gris de consistencia dura con pocas gravas, el contenido natural de agua promedio es de 8 %, los índices de plasticidad son LL = 47.5 % LP = 21.3 % IP = 26.2 %.   |
| 6.50 - 9.50           | Limo arcilloso color café claro de consistencia dura, el contenido natural de agua promedio es de 10 %. Los índices de plasticidad son: LL entre 35 y 46 %, LP entre 20.9 y 34.4 % e IP entre 14.06 y 11.59 %, el porcentaje de material fino es de 63.2 % |
| 9.50 - 10.70          | Limo arcilloso color café de consistencia dura con vetas de arena fina, el contenido natural de agua promedio es de 18 %, los índices de plasticidad son LL = 23.5 % LP = 12.2 % e , IP = 11.30 %  |
| 10.70 - 12.00         | Limo arcilloso color café blanquizco de consistencia dura, e contenido natural de agua promedio es de 22 %   |

### II.6.1.2.- En Bancos de Materiales.

Para evaluar la calidad en los bancos se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- Selección de acuerdo a la calidad de los materiales y al uso a que se dedicarán.
- Facilidad de acceso, considerando métodos de explotación más eficientes y menos costosos.
- Distancia de acarreo mínimas.
- Procedimiento de colocación del material con mínimos tratamientos.
- Bancos que no conducen a problemas legales.

Los resultados de las pruebas efectuadas en los bancos considerandos para la formación de terraplén es:

| <b>BANCO EL CONEJO</b>        |   |
|-------------------------------|---|
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 1</b> |   |
| <b>Profundidad</b>            | <b>Descripción</b>  |
| 0.00 - 3.00                   | Arcilla plástica color negro, el contenido natural de agua promedio es de 53 %.<br>Indices de plasticidad: LL = 82 %, LP = 35.1 % IP = 46.9 %<br>Porcentaje de material fino: %F = 96.8 %<br>Densidad de sólidos: Ss =<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.03 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 42 \%$<br>Clasificación: CH |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 2</b> |   |
| <b>Profundidad</b>            | <b>Descripción</b>  |
| 0.00- 3.00                    | Arcilla plástica color negro, el contenido natural de agua promedio es de 52 %<br>Indices de plasticidad: LL = 95 %, LP = 50.7 % IP = 44.3 %<br>Densidad de sólidos: Ss =<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.32 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 44 \%$<br>Clasificación: OH  |

| POZO A CIELO ABIERTO 3 |  |
|------------------------|--|
| Profundidad            | Descripción  |
|                        | <p>Arcilla color gris claro, con gravillas de hasta 3/4" de diámetro, el contenido natural de agua promedio es de 32 %</p> <p>Indices de plasticidad: LL = 88 %, LP = 34.6 % IP = 53.4 %</p> <p>Porcentaje de material fino: %F =      %</p> <p>Densidad de sólidos: Ss =</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.13 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 38 \%</math></p> <p>Clasificación: CH</p> |
| POZO A CIELO ABIERTO 4 |  |
| Profundidad            | Descripción  |
|                        | <p>Arcilla de alta plasticidad color negro, con materia orgánica, el contenido natural de agua promedio es de 47 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.11 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 38 \%</math></p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.32 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 36 \%</math></p>   |

El banco "El Conejo", se encuentra dentro del vaso de la presa del mismo nombre y esta constituido de una arcilla plástica de espesores que varían de 1 a 4 metros, el volumen que se considera aprovechable se estima superior al requerido de 750,000 m<sup>3</sup> y se ubica a 2 km, de la derivadora La Garrida (sitio donde da inicio el tramo del río en estudio).

| BANCO LA CALERA        |   |
|------------------------|---|
| POZO A CIELO ABIERTO 1 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 3.00            | <p>Arcilla plástica color café oscuro, el contenido natural de agua promedio es de 10 %</p> <p>Indices de plasticidad: LL = 40.5%, LP = 30.5 % IP = 10.00 %</p> <p>Porcentaje de material fino por lavado: %F = 41.10 %</p> <p>Densidad de sólidos: Ss =</p> <p>Granulometría: gravas = 0 % arenas = 93.8 % Fino = 6.2 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.43 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 13 \%</math></p> <p>Clasificación: CH</p>           |
| POZO A CIELO ABIERTO 2 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00- 3.00             | <p>Arcilla plástica color café oscuro, el contenido natural de agua promedio es de 8 %.</p> <p>Indices de plasticidad: LL = 45 %, LP = 32.1 % IP = 12.8 %</p> <p>Porcentaje de material fino: %F = 38 %</p> <p>Granulometría: gravas = 0 % arenas = 97.7 % Fino = 2.4 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.38 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 16 \%</math></p> <p>Clasificación: OL</p>  |
| POZO A CIELO ABIERTO 3 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00- 3.00             | <p>Arcilla limosa, el contenido natural de agua promedio es de 8 %.</p> <p>Indices de plasticidad: LL = 42 %, LP = 31.5 % IP = 10.5 %</p> <p>Porcentaje de material fino: %F = 41 %</p> <p>Granulometría: gravas = 0 % arenas = 93.9 % Fino = 6.1 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.38 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 29 \%</math></p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.41 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 15 \%</math> Clasificación: CH</p> |

Este banco llamado "La Calera", se encuentra constituido de arcillas limosas de baja plasticidad, cuenta con un volumen aproximado de 150,000 m<sup>3</sup> y se localiza a 5 km, del cruce entre el río Guanajuato y la Carretera Irapuato - León D/D 200 m.

| <b>BANCO ALDAMA</b>           |  |
|-------------------------------|--|
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 1</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00                   | Arcilla plástica color café claro, el contenido natural de agua promedio es de 18 %.<br>Indices de plasticidad: LL = 26.4%, LP = 16.3 % IP = 10.1 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.30 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 36 \%$<br>Clasificación: CL |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 2</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00- 3.00                    | Arcilla plástica color rojizo con poca arena fina, el contenido natural de agua es de 15.3 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.16 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 35 \%$<br>Clasificación: OL  |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 3</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00                   | Arcilla limosa color café claro, el contenido natural de agua promedio es de 12 %<br>Indices de plasticidad: LL = 52.50 %, LP = 22.5 % IP = 29.9<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.53 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 16 \%$<br>Clasificación: CH    |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 4</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
|                               | Arcilla poco arenosa color café oscuro, el contenido natural de agua promedio es de 18 %.<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.63 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 20 \%$  |

El banco "Aldama" se encuentra constituido por arcillas inorgánicas de baja y alta plasticidad, producto del despalme realizado por la trituradora Aldama, cuenta con un volumen aproximado de  $400,000 \text{ m}^3$ , y se localiza a 19 km, del cruce entre el río Guanajuato y la Carretera Irapuato-León D/D 3.5 km, conviene señalar que éste material es considerado como "estorbo" por los propietarios de la trituradora.

| <b>BANCO CEFERINO</b>         |  |
|-------------------------------|--|
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 1</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00 - 1.00                   | Arcilla color café con gravillas y arena fina, el contenido natural de agua promedio es de 22 %<br>Indices de plasticidad: LL = 57.5 %, LP = 28.72 IP = 28.8<br>Porcentaje de material fino por lavado: %F = 19 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.59 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 19 \%$<br>Clasificación: CH |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 2</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00- 2.00                    | Arcilla color café claro con gravilla y arena fina, el contenido natural de agua promedio es de 22%<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.55 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 24 \%$<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.23 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 29 \%$<br>Clasificación:  |

Banco "Ceferino", constituido por arcillas limosas de baja plasticidad, el espesor que se considera aprovechable es de 2 a 3 metros, con un volumen aproximado de 100,000 m<sup>3</sup>, y se ubica a la margen derecha (dirección hacia La Garrida) del río Guanajuato a unos 50 m.

| <b>BANCO FONSECA</b>          |  |
|-------------------------------|--|
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 1</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00 - 3.00                   | Arcilla color gris claro con gravillas y arena fina, el contenido natural de agua es de 22 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.22 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 29 \%$<br>Clasificación:   |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 2</b> |  |
| Profundidad                   | Descripción  |
| 0.00- 3.00                    | Arcilla color gris claro con gravillas y arena fina, el contenido natural de agua es de 20 %<br>Indices de plasticidad: LL = 55%, LP = 32 % , IP = 23 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.21 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 34 \%$<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.23 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 29 \%$<br>Clasificación: CH |

Banco "Fonseca", formado de arcillas limosas, cuenta con un volumen aproximado de 50,00 m<sup>3</sup> y se ubica a la margen izquierda (dirección hacia La Garrida) del río Guanajuato a unos 1,100 m.

Considerando los factores mencionados, se recomienda emplear en el cuerpo de terraplén el material del banco "El Conejo", ya que cumple con la calidad requerida y los terrenos que la constituyen están en trámite para ser adquiridos por parte de la Comisión Nacional del Agua (CNA), lo que representa un ahorro importante en la adquisición del material y abatimiento de acarreo.

Es importante señalar, el material que se pretende emplear en la adecuación del encauzamiento del Río Guanajuato debe ser una arcilla plástica que garantice la impermeabilidad de los bordos.

Finalmente se presentan los resultados de las pruebas efectuados en los bancos considerados para el revestimiento de los bordos:

| BANCO CEFERINO         |   |
|------------------------|---|
| POZO A CIELO ABIERTO 1 |   |
| Profundidad            | Descripción   |
| 0.00 - 3.00            | <p>Arcilla color gris claro con gravillas y arena fina, el contenido natural de agua es de 22 %</p> <p>Granulometría: gravas = 45 % arenas = 47 % Fino = 8 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.62 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 18 \%</math></p> <p>Clasificación: SP</p> |

Banco "Ceferino" constituido de arenas limosas con boleos, cuenta con un volumen aprovechable de  $15,000 \text{ m}^3$ , y se ubica a la margen derecha (dirección hacia La Garrida) del río Guanajuato a unos 50 m.

| BANCO EL GATO          |  |
|------------------------|--|
| POZO A CIELO ABIERTO 1 |  |
| Profundidad            | Descripción  |
| 0.00 - 3.00            | <p>Arena limosa color café oscuro.</p> <p>Porcentaje de material fino por lavado: %F = 10 %</p> <p>Granulometría: gravas = 27 % arenas = 63.70 % Fino = 9.30 %</p> <p><math>\gamma_{m_{max}} = 1.67 \text{ t/m}^2</math> <math>w_{op} = 13 \%</math></p> <p>Clasificación:</p> |

Banco "El Gato", constituido de arenas limosas, se localiza a 5 km del tramo final del río en estudio, el volumen considerando aprovechable es de  $40,000 \text{ m}^3$ , el banco se encuentra actualmente en explotación.

| <b>BANCO LADERA</b>           |  |
|-------------------------------|--|
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 1</b> |  |
| <b>Profundidad</b>            | <b>Descripción</b>   |
| 0.00 - 3.00                   | Arena arcillosa con gravillas<br>Indices de plasticidad: LL = 64.3%, LP = 30.79 % IP = 33.51 %<br>Porcentaje de material fino por lavado: %F = 41.10 %<br>Granulometría: gravas = 68.6 % arenas = 30.9 % Fino = 0.5 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.54 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 13 \%$<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.62 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 16 \%$<br>Clasificación: SP |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 2</b> |  |
| <b>Profundidad</b>            | <b>Descripción</b>   |
| 0.00 - 3.00                   | Area arcillosa con gravillas y bolecos mayores de 7.5 cm.<br>Indices de plasticidad: LL = 61.3%, LP = 30.33 % IP = 30.97 %<br>Granulometría: gravas = 61.1 % arenas = 38.6 % Fino = 0.3 %<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.47 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 18 \%$<br>Clasificación: SP   |
| <b>POZO A CIELO ABIERTO 3</b> |  |
| <b>Profundidad</b>            | <b>Descripción</b>   |
| 0.00 - 3.00                   | Arena arcillosa con poco limo y bolecos<br>Indices de plasticidad: LL = 73 %, LP = 33.91% IP = 39.09 %<br>Porcentaje de material fino por lavado: %F = 10 %<br>Granulometría: gravas = 62.1 % arenas = 19.3 % Fino = 19.60%<br>$\gamma_{m_{max}} = 1.49 \text{ t/m}^2$ $w_{op} = 22 \%$<br>Clasificación: GP   |

Banco "Ladera", constituido de gravas arenosas, se localiza en el cerro del mismo nombre a 6 km D/D del libramiento a León, el volumen considerado aprovechable es superior al requerido por el proyecto 40,000 m<sup>3</sup>.

En lo referente al material a emplearse en el revestimiento de los caminos, se recomienda emplear el del banco Ceferino, y si resulta escaso se podrá complementar con material obtenido del banco La Ladera.

## CAPÍTULO III

### PROYECTO GEOMETRICO Y ANALISIS DE ESTABILIDAD

#### III.1.- ESTUDIO HIDROLOGICO.

Se conoce como tránsito de avenidas en cauces a la modelación numérica de la variación de un hidrograma al recorrer un tramo de cauce.

Este método permite conocer la variación del gasto a lo largo de un tramo de cauce en una avenida (régimen de flujo no uniforme y no permanente), con lo cual se puede conocer el tirante máximo durante una avenida e inferir el bordo libre de la sección transversal que servirá de protección contra inundaciones, como es el caso del presente estudio.

##### III.1.1.- Características Hidrológicas de la Zona en Estudio.

Para realizar el estudio hidrológico del río Guanajuato se consideró el funcionamiento de las presas existentes sobre el cauce del río Guanajuato, las presas La Purísima y La Garrida, ambas para el control de avenidas, así como los escurrimientos por cuenca propia y de sus afluentes El Carrizalito y Santa Rita, determinando los gastos para los diferentes tramos.

La presa La Purísima se construyó con el objeto de controlar las avenidas de la cuenca alta del río Guanajuato, inició sus operaciones en el año de 1980 y a partir de esa fecha ha regulado por completo los escurrimientos del río, ya que de acuerdo a los registros disponibles de su funcionamiento, en el período de 1980 a 1997 la presa no ha derramado.

La presa la Garrida es una estructura derivadora que conduce los excedentes del río Guanajuato hacia el río Silao, no existen registros de su funcionamiento por carecer de observaciones en su operación, pero a partir de los análisis registrados en la estación hidrométrica Tepalcates localizada sobre el canal del mismo nombre que conduce escurrimientos hacia el río Silao, se determinó en  $43.07 \text{ m}^3/\text{s}$  el gasto máximo que el canal puede conducir; en la tabla 10 se observan los gastos anuales registrados por la estación.

Tabla 10. Gastos Máximos en la Estación Tepalcates.

| No. ORDEN | FECHA    | GASTO<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | No. ORDEN | FECHA     | GASTO<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |
|-----------|----------|------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------|
| 1         | JUL 1991 | 43.07                              | 11        | JUN 1978  | 16.35                              |
| 2         | SEP 1996 | 42.37                              | 12        | AGO 1988  | 16.22                              |
| 3         | SEP 1989 | 31.30                              | 13        | SEP 1978  | 14.80                              |
| 4         | SEP 1977 | 30.17                              | 14        | AGO 1980  | 14.45                              |
| 5         | AGO 1991 | 26.15                              | 15        | OCT 1978  | 14.10                              |
| 6         | SEP 1977 | 26.11                              | 16        | JUN 1981  | 13.82                              |
| 7         | JUN 1978 | 23.81                              | 17        | SEP 1996  | 13.52                              |
| 8         | AGO 1977 | 18.61                              | 18        | SEP 1977  | 13.12                              |
| 9         | JUL 1993 | 17.48                              | 19        | AGOS 1979 | 11.54                              |
| 10        | AGO 1989 | 16.53                              |           |           |                                    |

Sin embargo, la política de operación de esta obra se encuentra sujeta a la observación de los escurrimientos que se presentan simultáneamente en los ríos Silao y Guanajuato, abriéndose o cerrándose las compuertas de la presa según los reportes que por radio se dan de los niveles de ambos cauces. Por lo anterior, para el análisis hidrológico de la cuenca propia del río Guanajuato, no se consideró la regulación de los escurrimientos que en la presa se podrían realizar, considerando que ante la presencia de una tormenta extraordinaria que abarque ambas cuencas, los niveles del río Silao podrían ser lo suficientemente altos que eviten la derivación de escurrimientos hacia ese cauce, motivo por el cual se

determinó como aportación del río Guanajuato hasta el sitio en estudio, la totalidad de los escurrimientos generados desde la Presa La Purísima.

La cuenca en estudio está alargada de norte a sur con una extensión amplia hacia el este; en su eje mayor desde el cerro El Capulín en el norte, hasta el cruce del río Guanajuato con la autopista Querétaro-Irapuato en el sur, mide unos 35 km; en su eje menor, desde la Sierra El Copal en el este hasta los valles Silao en el oeste, mide del orden de 12 km. Cubre una superficie aproximada de 352 km<sup>2</sup>, de los cuales, 240 km<sup>2</sup> corresponden a la cuenca propia del tramo del río en estudio, incluyendo 9.30 km<sup>2</sup> de la cuenca del Arroyo Carrizalito y 45 km<sup>2</sup> de la cuenca del Arroyo Santa Rita. En la figura 15, se muestra de manera esquemática el sistema hidrográfico principal de la zona en estudio.

### III.1.2.- Obtención de Gastos Máximos.

Para la obtención de los gastos y avenidas de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, tanto para el cauce principal, el río Guanajuato, como para sus afluentes principales, los arroyos Carrizalito y Santa Rita, se tomó como base el funcionamiento de las presas existentes sobre el cauce.

Como se indicó anteriormente, la presa La Purísima controla por completo las aportaciones de la cuenca alta, por lo cual la generación de escurrimientos hacia el sitio en estudio se inicia aguas abajo de esta estructura, por esta razón el parteaguas de la cuenca en estudio inicia en este punto. Por otro lado, en el caso de que exista una tormenta extraordinaria es posible controlar sus efectos mediante el uso de las compuertas de la presa La Garrida evitando aportaciones a la cuenca en estudio, es por ello que se consideró más apropiado el determinar las avenidas de diseño de la cuenca total sin derivación hacia la cuenca del río Silao, condición más desfavorable que permite de manera implícita considerar un factor de seguridad en la determinación de avenidas de diseño.

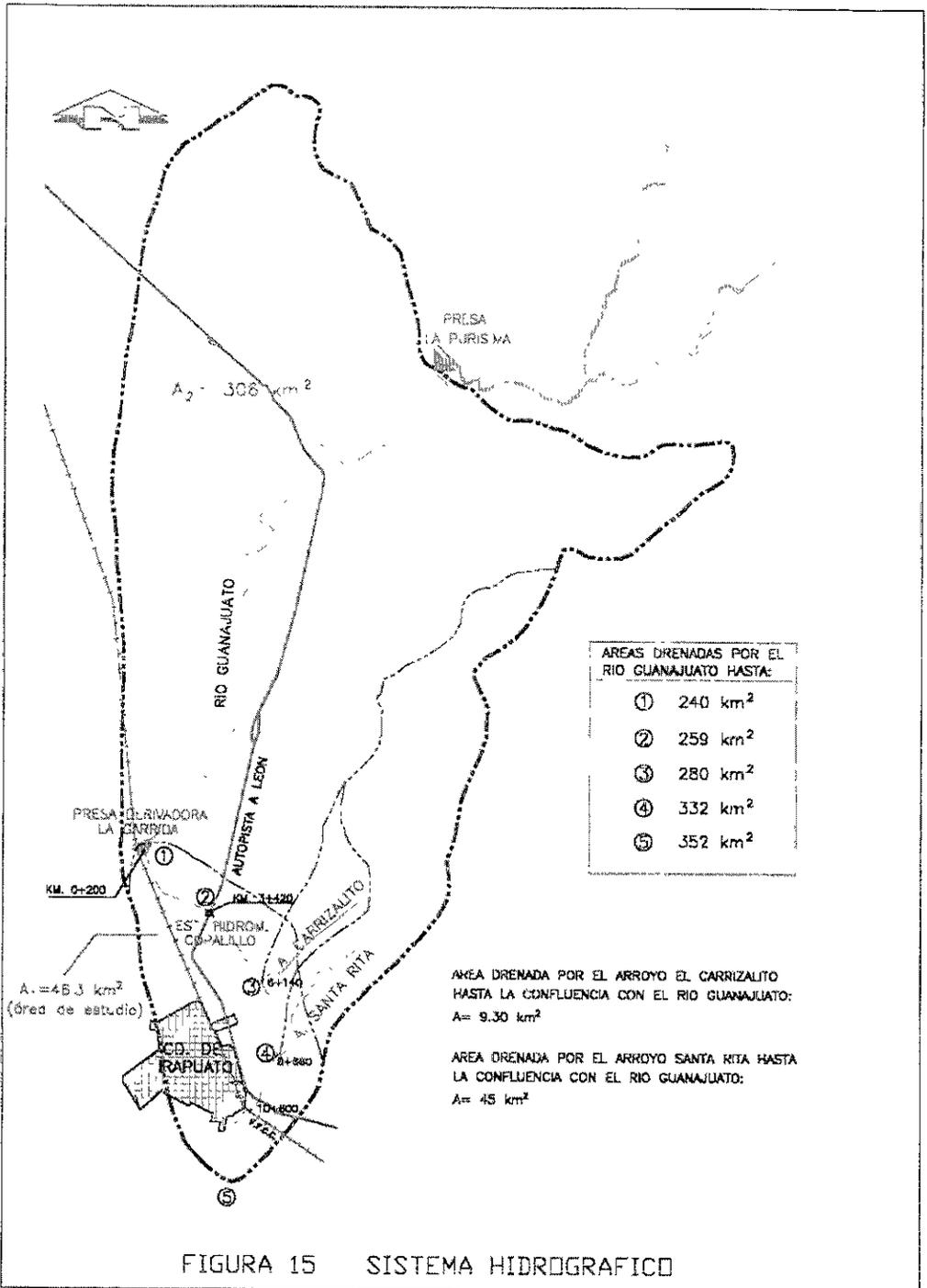


FIGURA 15 SISTEMA HIDROGRAFICO

Para la determinación de las avenidas de diseño, se seleccionaron siete subcuencas de interés que se muestran de manera esquemática en la figura 16, y que se enlistan a continuación:

1. Río Guanajuato hasta el sitio de la Presa La Garrida.
2. Río Guanajuato en el sitio de la Estación Hidrométrica Copalillo.
3. Río Guanajuato en el punto de confluencia del Arroyo Carrizalito.
4. Río Guanajuato en el punto de confluencia del Arroyo Santa Rita.
5. Río Guanajuato en el cruce de éste con la autopista Querétaro-Irapuato, punto final del tramo en estudio.
6. Arroyo Carrizalito en la descarga al Río Guanajuato.
7. Arroyo Santa Rita en a descarga al Río Guanajuato.

Con base a esta división, se determinó que en la cuenca en estudio existe la estación hidrométrica Copalillo con registros desde el año de 1977, así como las estaciones climatológicas de Irapuato y El Conejo, ambas con observaciones de pluviómetro, termómetro y evaporímetro, con registros desde el año de 1990; no existe información pluviográfica en la cuenca, la estación más cercana con este tipo de registros es la estación Las Adjuntas ubicada en la localidad de Manuel Doblado.

Por su ubicación, se aceptó a la estación Copalillo como representativa de las características de los escurrimientos de esta cuenca, para obtener los gastos máximos ligados a diferentes períodos de retorno se realizó un análisis regional de los escurrimientos, los valores obtenidos de los gastos para diferentes períodos de retorno en el sitio de la estación se ajustaron en proporción a las áreas de drenaje de las diversas subcuencas y los tiempos a sus características fisiográficas.

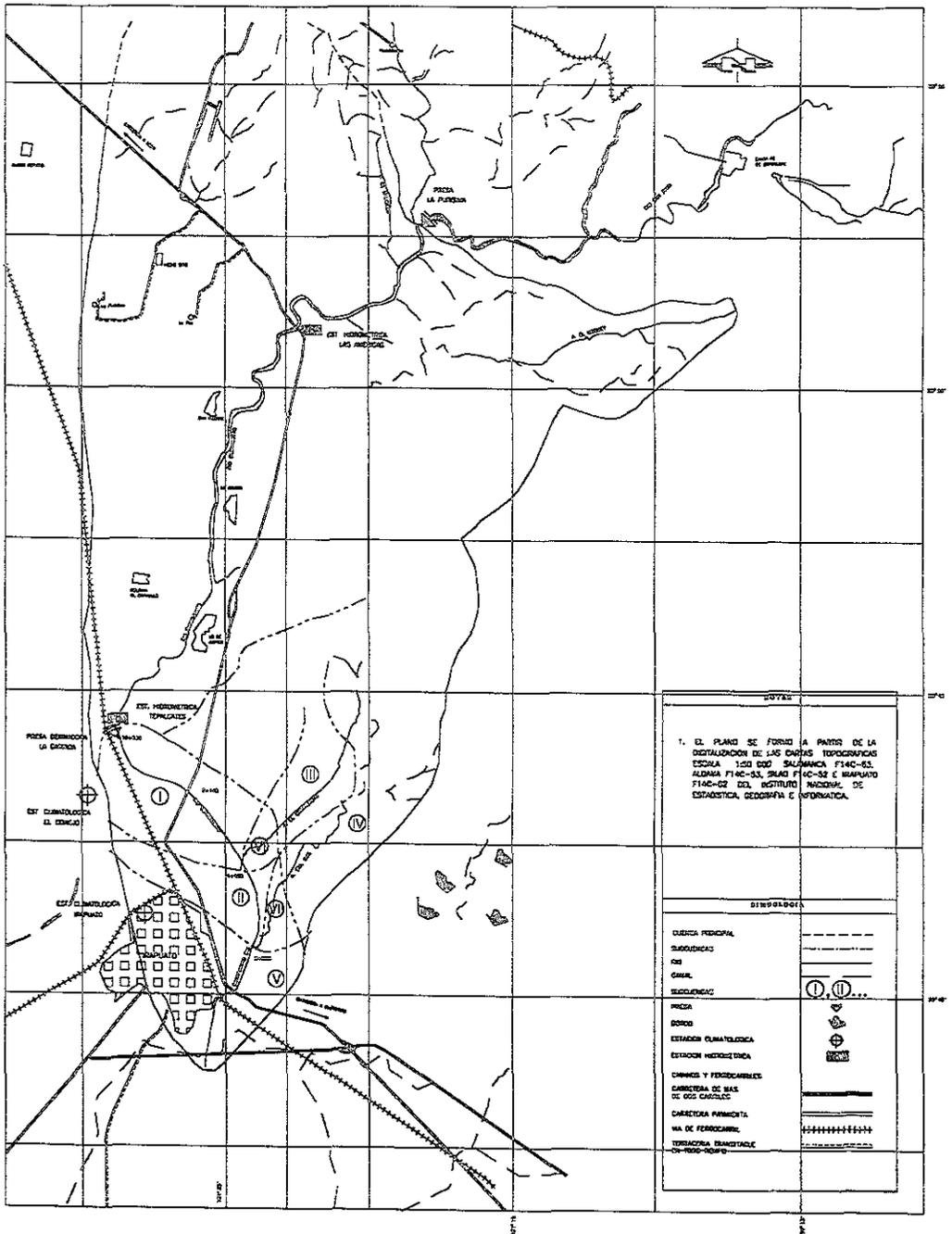


FIGURA 16. CUENCAS DE INTERES

A partir de los registros de la estación hidrométrica se seleccionaron los gastos máximos de acuerdo a una serie de excedentes anuales, lo anterior debido a que existen varios años secos en que los escurrimientos son escasos; en la tabla 11 se resumen estos datos. Posteriormente se determinó el período de retorno de acuerdo a la siguiente relación:

$$T = \frac{n}{m}$$

en donde :  $m$  número de orden del gasto máximo en el análisis, corresponde 1 al más grande, 2 al siguiente, etc.  
 $n$  años de registro, igual al número de gastos máximos en estudio.  
 $T$  período de retorno correspondiente en años.

Cuando se analizan gastos máximos anuales en ocasiones se tiene que algunos ocurren durante la época de ciclones y otros no, con lo cual la información puede estar constituida por dos poblaciones distintas, por lo que antes de proceder al ajuste de la información a una cierta distribución de frecuencias, se graficarón los gastos máximos registrados con respecto a sus períodos de retorno en papel de probabilidades de "Gumbel"<sup>1</sup>. De esta manera se determinó la tendencia de la muestra, la cual corresponde a una sola población.

Con objeto de encontrar la mejor distribución de probabilidades a esta muestra, se aplicaron los modelos propuestos por "Gumbel, Nash"<sup>2</sup> y un ajuste por mínimos cuadrados, encontrando para este caso que el mejor ajuste fue el obtenido mediante la aplicación del modelo de una ecuación logarítmica obtenida mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

La ecuación utilizada fue del tipo:

$$Q = A + B * \log T$$

<sup>1</sup> Aparicio Mijares Francisco J. *Apuntes de Hidrología de Superficie*. Facultad de Ingeniería, 1987.

<sup>2</sup> Aparicio Mijares Francisco J. *Idem*.

donde :  $A, B$  parámetros de ajuste.  
 $T$  período de retorno correspondiente, en años.  
 $Q$  gasto máximo relacionado con  $T$ , en  $m^3/s$ .

Una vez ordenados los datos de gastos máximos de mayor a menor, asociados a su período de retorno y expresados en escala logarítmica, se puede realizar la regresión lineal; la ecuación obtenida fue:

$$Q = 15.1203 + 381126 * \log T$$

En la tabla 11 además de la información indicada, se muestran los resultados obtenidos con la aplicación de este modelo.

Tabla 11. Gastos Máximos en la Estación Hidrométrica Copalillo y Determinación del Modelo de Correlación Lineal.

| FECHA     | GASTO<br>$m^3/s$ | No.<br>ORDEN | T<br>(años) | log T  |
|-----------|------------------|--------------|-------------|--------|
| 3-Sep-97  | 62.412           | 1            | 20.00       | 1.3010 |
| 7-Oct-78  | 57.969           | 2            | 10.00       | 1.0000 |
| 3-Ago-81  | 49.183           | 3            | 6.67        | 0.8239 |
| 2-Sep-80  | 39.808           | 4            | 5.00        | 0.6990 |
| 14-Ago-83 | 35.270           | 5            | 4.00        | 0.6021 |
| 28-Jul-81 | 33.919           | 6            | 3.33        | 0.5229 |
| 30-Ago-77 | 31.441           | 7            | 2.86        | 0.4559 |
| 3-Ago-78  | 30.454           | 8            | 2.50        | 0.3979 |
| 2-Sep-81  | 27.693           | 9            | 2.22        | 0.3468 |
| 1-Ago-88  | 27.103           | 10           | 2.00        | 0.3010 |
| 13-Ago-79 | 25.794           | 11           | 1.82        | 0.2596 |
| 4-Jul-84  | 23.093           | 12           | 1.67        | 0.2218 |
| 1-Ago-89  | 22.579           | 13           | 1.54        | 0.1871 |
| 13-Ago-78 | 21.864           | 14           | 1.43        | 0.1549 |
| 15-Jul-83 | 19.228           | 15           | 1.33        | 0.1249 |
| 9-Ago-83  | 18.214           | 16           | 1.25        | 0.0969 |
| 28-Sep-78 | 17.620           | 17           | 1.18        | 0.0706 |
| 18-Jul-82 | 17.433           | 18           | 1.11        | 0.0458 |
| 1-Sep-89  | 16.860           | 19           | 1.05        | 0.0223 |
| 25-Jul-77 | 15.439           | 20           | 1.00        | 0.0000 |

La ecuación del ajuste representa el modelo de gastos máximos de diseño asociados a diversos períodos de retorno para la cuenca del drenaje del río Guanajuato hasta el sitio de la estación hidrométrica Copalillo. Para obtener los gastos máximos ligados a los períodos de retorno de 50, 100, 500 y 1,000 años consignados en los términos de referencia en cada una de las subcuencas de estudio identificadas con anterioridad, se ajustó la ecuación anterior para cada una de ellas en proporción a sus cuencas de drenaje. Los resultados obtenidos se consignan en la tabla 12, mientras que en la figura 17 se presentan los gastos de diseño en los tramos A, B, C, D y E para los períodos de retorno ya mencionados.

Tabla 12. Ordenamiento del Cálculo Para Deducir la Distribución de Frecuencias de Gumbel.

| No. ORDEN | FECHA     | GASTO m <sup>3</sup> /s | T (años) | $Y_i - Y_{med}$ | $(Y_i - Y_{med})^2$ |
|-----------|-----------|-------------------------|----------|-----------------|---------------------|
| 1         | 3-Sep-97  | 62.412                  | 21.00    | 32.74           | 1,072.12            |
| 2         | 7-Oct-78  | 57.969                  | 10.50    | 28.30           | 800.90              |
| 3         | 3-Ago-81  | 49.183                  | 7.00     | 19.51           | 380.80              |
| 4         | 2-Sep-80  | 39.808                  | 5.25     | 10.14           | 102.80              |
| 5         | 14-Ago-83 | 35.270                  | 4.20     | 5.60            | 31.37               |
| 6         | 28-Jul-81 | 33.919                  | 3.50     | 4.25            | 18.06               |
| 7         | 30-Ago-77 | 31.441                  | 3.00     | 1.77            | 3.14                |
| 8         | 3-Ago-78  | 30.454                  | 2.63     | 0.79            | 0.62                |
| 9         | 2-Sep-81  | 27.693                  | 2.33     | -1.98           | 3.90                |
| 10        | 1-Ago-88  | 27.103                  | 2.10     | -2.57           | 6.58                |
| 11        | 13-Ago-79 | 25.794                  | 1.91     | -3.87           | 15.01               |
| 12        | 4-Jul-84  | 23.093                  | 1.75     | -6.58           | 43.24               |
| 13        | 1-Ago-89  | 22.579                  | 1.62     | -7.09           | 50.27               |
| 14        | 13-Ago-78 | 21.864                  | 1.50     | -7.80           | 60.91               |
| 15        | 15-Jul-83 | 19.228                  | 1.40     | -10.44          | 109.01              |
| 16        | 9-Ago-83  | 18.214                  | 1.31     | -11.45          | 131.21              |
| 17        | 28-Sep-78 | 17.620                  | 1.24     | -12.05          | 145.17              |
| 18        | 18-Jul-82 | 17.433                  | 1.17     | -12.24          | 149.71              |
| 19        | 1-Sep-89  | 16.860                  | 1.11     | -12.81          | 164.07              |
| 20        | 25-Jul-77 | 15.439                  | 1.05     | -14.23          | 202.49              |
|           | SUMAS     | 593.376                 |          |                 | 3,491.41            |
|           | MEDIA     | 29.669                  |          |                 |                     |

$$Y_{med} = 29.669$$

$$n = 20$$

$$S_y = 13.556$$

$$Y_n = 0.52355$$

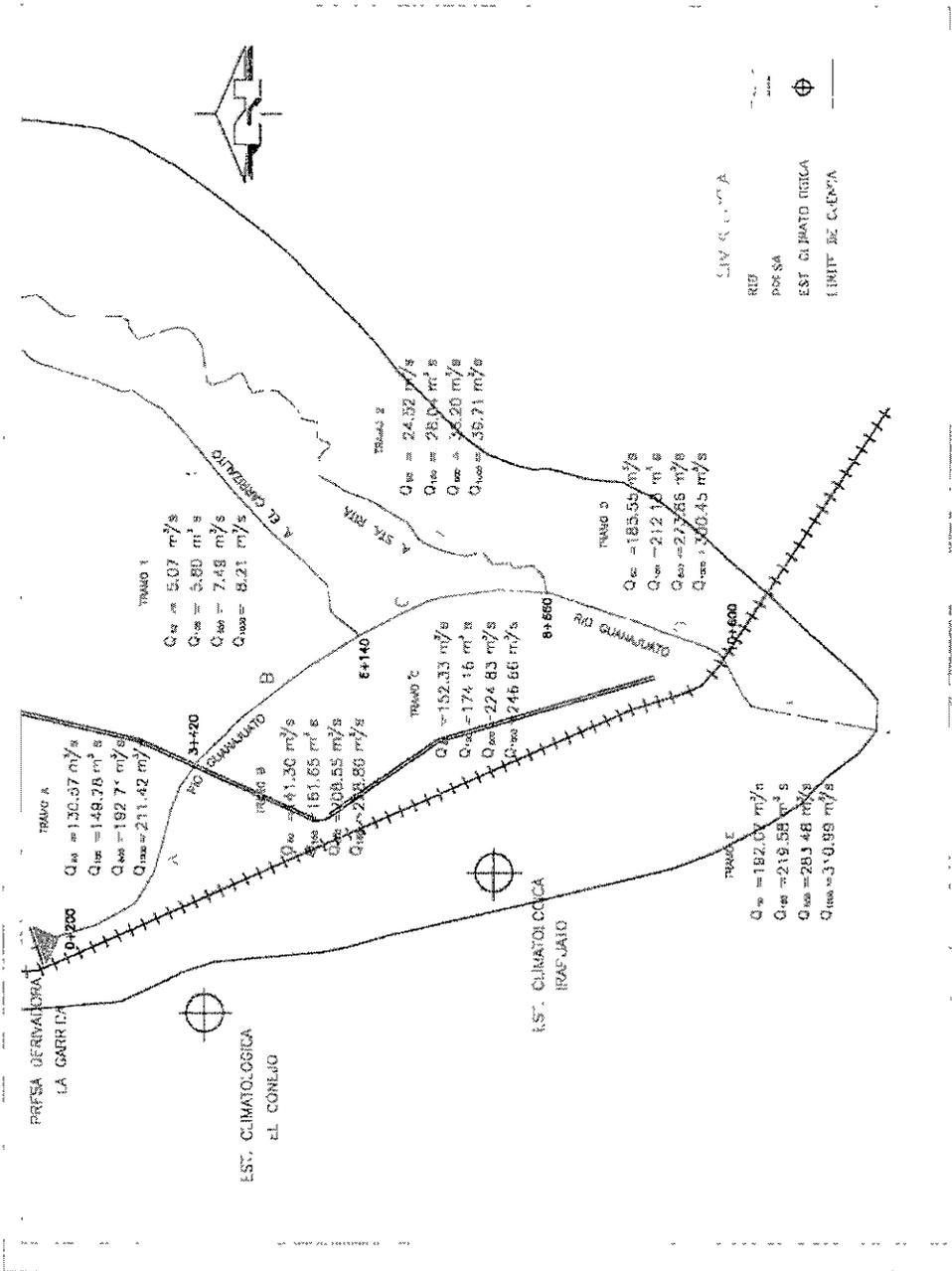
$$\sigma_n = 1.06283$$

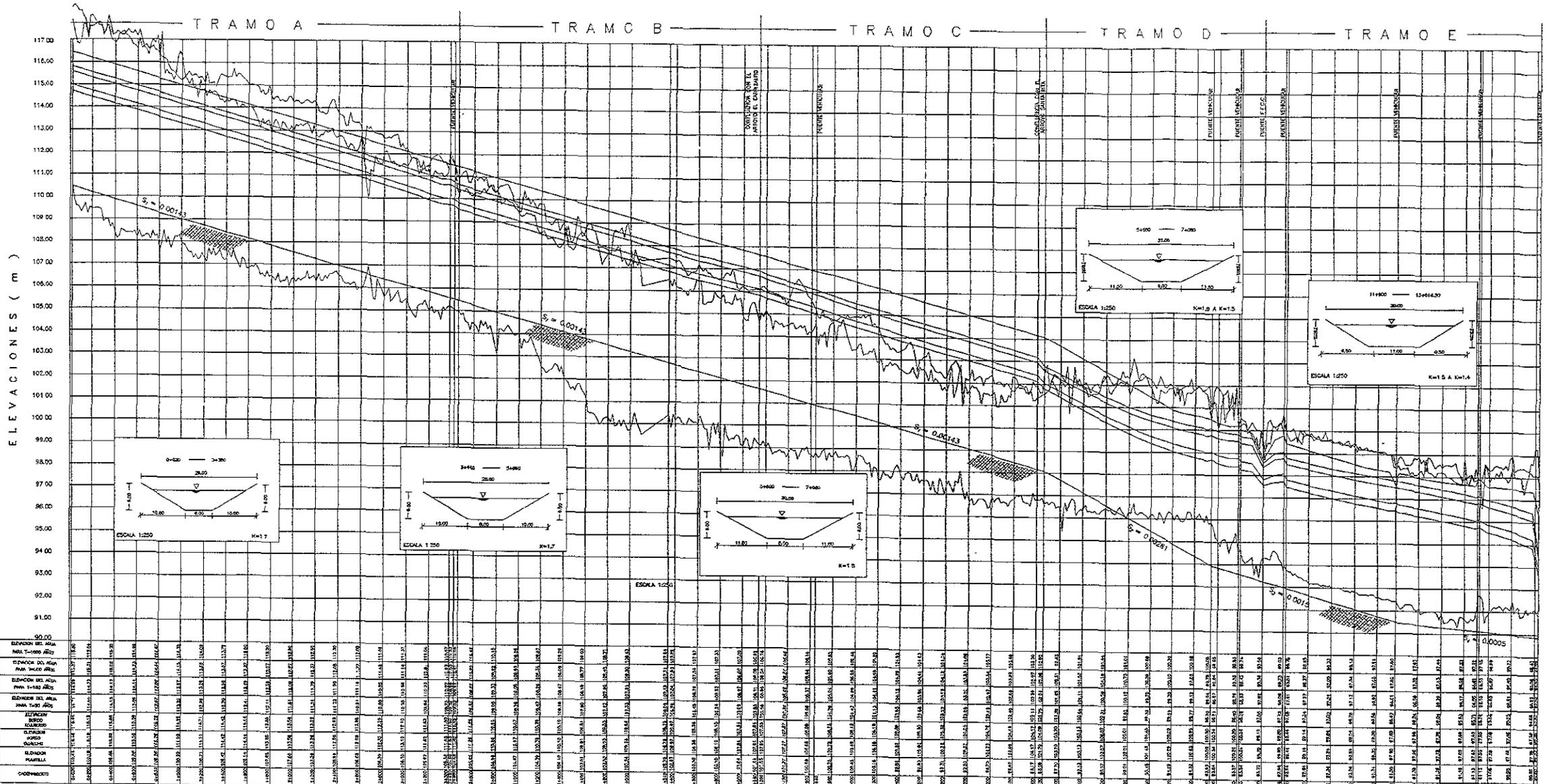
$$Y = 22.991 - 12.755 \log_e * \log_e [T / (T-1)]$$

### III.1.3.- Definición de Secciones.

Con base al estudio hidráulico realizado, se obtuvo el perfil hidráulico de diseño del río Guanajuato para los gastos asociados a diferentes periodos de retorno (plano 1). La realización del estudio se dividió en cinco tramos A, B, C, D y E, por presentar la misma sección en los tramos identificados. Hidráulicamente el río Guanajuato cubre con área hidráulica para soportar cualquier desfavorable avenida, como lo ha demostrado los diversos análisis demostrados. Las secciones hidráulicas dibujadas en el plano se tomarán en cuenta para el análisis de estabilidad por presentar semejanza con las obtenidas en el levantamiento topográfico.

CASOS DE DISEÑO POR TRAMO DE ANALISIS PARA  
DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO





| ESTACION | ELEVACION DEL AGUA PARA T=1000 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=500 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=100 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=50 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=10 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=5 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=2 AÑOS | ELEVACION DEL AGUA PARA T=1 AÑO |
|----------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0+00     | 116.50                              | 115.50                             | 114.50                             | 113.50                            | 112.50                            | 111.50                           | 110.50                           | 109.50                          |
| 0+10     | 116.40                              | 115.40                             | 114.40                             | 113.40                            | 112.40                            | 111.40                           | 110.40                           | 109.40                          |
| 0+20     | 116.30                              | 115.30                             | 114.30                             | 113.30                            | 112.30                            | 111.30                           | 110.30                           | 109.30                          |
| 0+30     | 116.20                              | 115.20                             | 114.20                             | 113.20                            | 112.20                            | 111.20                           | 110.20                           | 109.20                          |
| 0+40     | 116.10                              | 115.10                             | 114.10                             | 113.10                            | 112.10                            | 111.10                           | 110.10                           | 109.10                          |
| 0+50     | 116.00                              | 115.00                             | 114.00                             | 113.00                            | 112.00                            | 111.00                           | 110.00                           | 109.00                          |
| 0+60     | 115.90                              | 114.90                             | 113.90                             | 112.90                            | 111.90                            | 110.90                           | 109.90                           | 108.90                          |
| 0+70     | 115.80                              | 114.80                             | 113.80                             | 112.80                            | 111.80                            | 110.80                           | 109.80                           | 108.80                          |
| 0+80     | 115.70                              | 114.70                             | 113.70                             | 112.70                            | 111.70                            | 110.70                           | 109.70                           | 108.70                          |
| 0+90     | 115.60                              | 114.60                             | 113.60                             | 112.60                            | 111.60                            | 110.60                           | 109.60                           | 108.60                          |
| 1+00     | 115.50                              | 114.50                             | 113.50                             | 112.50                            | 111.50                            | 110.50                           | 109.50                           | 108.50                          |
| 1+10     | 115.40                              | 114.40                             | 113.40                             | 112.40                            | 111.40                            | 110.40                           | 109.40                           | 108.40                          |
| 1+20     | 115.30                              | 114.30                             | 113.30                             | 112.30                            | 111.30                            | 110.30                           | 109.30                           | 108.30                          |
| 1+30     | 115.20                              | 114.20                             | 113.20                             | 112.20                            | 111.20                            | 110.20                           | 109.20                           | 108.20                          |
| 1+40     | 115.10                              | 114.10                             | 113.10                             | 112.10                            | 111.10                            | 110.10                           | 109.10                           | 108.10                          |
| 1+50     | 115.00                              | 114.00                             | 113.00                             | 112.00                            | 111.00                            | 110.00                           | 109.00                           | 108.00                          |
| 1+60     | 114.90                              | 113.90                             | 112.90                             | 111.90                            | 110.90                            | 109.90                           | 108.90                           | 107.90                          |
| 1+70     | 114.80                              | 113.80                             | 112.80                             | 111.80                            | 110.80                            | 109.80                           | 108.80                           | 107.80                          |
| 1+80     | 114.70                              | 113.70                             | 112.70                             | 111.70                            | 110.70                            | 109.70                           | 108.70                           | 107.70                          |
| 1+90     | 114.60                              | 113.60                             | 112.60                             | 111.60                            | 110.60                            | 109.60                           | 108.60                           | 107.60                          |
| 2+00     | 114.50                              | 113.50                             | 112.50                             | 111.50                            | 110.50                            | 109.50                           | 108.50                           | 107.50                          |
| 2+10     | 114.40                              | 113.40                             | 112.40                             | 111.40                            | 110.40                            | 109.40                           | 108.40                           | 107.40                          |
| 2+20     | 114.30                              | 113.30                             | 112.30                             | 111.30                            | 110.30                            | 109.30                           | 108.30                           | 107.30                          |
| 2+30     | 114.20                              | 113.20                             | 112.20                             | 111.20                            | 110.20                            | 109.20                           | 108.20                           | 107.20                          |
| 2+40     | 114.10                              | 113.10                             | 112.10                             | 111.10                            | 110.10                            | 109.10                           | 108.10                           | 107.10                          |
| 2+50     | 114.00                              | 113.00                             | 112.00                             | 111.00                            | 110.00                            | 109.00                           | 108.00                           | 107.00                          |
| 2+60     | 113.90                              | 112.90                             | 111.90                             | 110.90                            | 109.90                            | 108.90                           | 107.90                           | 106.90                          |
| 2+70     | 113.80                              | 112.80                             | 111.80                             | 110.80                            | 109.80                            | 108.80                           | 107.80                           | 106.80                          |
| 2+80     | 113.70                              | 112.70                             | 111.70                             | 110.70                            | 109.70                            | 108.70                           | 107.70                           | 106.70                          |
| 2+90     | 113.60                              | 112.60                             | 111.60                             | 110.60                            | 109.60                            | 108.60                           | 107.60                           | 106.60                          |
| 3+00     | 113.50                              | 112.50                             | 111.50                             | 110.50                            | 109.50                            | 108.50                           | 107.50                           | 106.50                          |
| 3+10     | 113.40                              | 112.40                             | 111.40                             | 110.40                            | 109.40                            | 108.40                           | 107.40                           | 106.40                          |
| 3+20     | 113.30                              | 112.30                             | 111.30                             | 110.30                            | 109.30                            | 108.30                           | 107.30                           | 106.30                          |
| 3+30     | 113.20                              | 112.20                             | 111.20                             | 110.20                            | 109.20                            | 108.20                           | 107.20                           | 106.20                          |
| 3+40     | 113.10                              | 112.10                             | 111.10                             | 110.10                            | 109.10                            | 108.10                           | 107.10                           | 106.10                          |
| 3+50     | 113.00                              | 112.00                             | 111.00                             | 110.00                            | 109.00                            | 108.00                           | 107.00                           | 106.00                          |
| 3+60     | 112.90                              | 111.90                             | 110.90                             | 109.90                            | 108.90                            | 107.90                           | 106.90                           | 105.90                          |
| 3+70     | 112.80                              | 111.80                             | 110.80                             | 109.80                            | 108.80                            | 107.80                           | 106.80                           | 105.80                          |
| 3+80     | 112.70                              | 111.70                             | 110.70                             | 109.70                            | 108.70                            | 107.70                           | 106.70                           | 105.70                          |
| 3+90     | 112.60                              | 111.60                             | 110.60                             | 109.60                            | 108.60                            | 107.60                           | 106.60                           | 105.60                          |
| 4+00     | 112.50                              | 111.50                             | 110.50                             | 109.50                            | 108.50                            | 107.50                           | 106.50                           | 105.50                          |
| 4+10     | 112.40                              | 111.40                             | 110.40                             | 109.40                            | 108.40                            | 107.40                           | 106.40                           | 105.40                          |
| 4+20     | 112.30                              | 111.30                             | 110.30                             | 109.30                            | 108.30                            | 107.30                           | 106.30                           | 105.30                          |
| 4+30     | 112.20                              | 111.20                             | 110.20                             | 109.20                            | 108.20                            | 107.20                           | 106.20                           | 105.20                          |
| 4+40     | 112.10                              | 111.10                             | 110.10                             | 109.10                            | 108.10                            | 107.10                           | 106.10                           | 105.10                          |
| 4+50     | 112.00                              | 111.00                             | 110.00                             | 109.00                            | 108.00                            | 107.00                           | 106.00                           | 105.00                          |
| 4+60     | 111.90                              | 110.90                             | 109.90                             | 108.90                            | 107.90                            | 106.90                           | 105.90                           | 104.90                          |
| 4+70     | 111.80                              | 110.80                             | 109.80                             | 108.80                            | 107.80                            | 106.80                           | 105.80                           | 104.80                          |
| 4+80     | 111.70                              | 110.70                             | 109.70                             | 108.70                            | 107.70                            | 106.70                           | 105.70                           | 104.70                          |
| 4+90     | 111.60                              | 110.60                             | 109.60                             | 108.60                            | 107.60                            | 106.60                           | 105.60                           | 104.60                          |
| 5+00     | 111.50                              | 110.50                             | 109.50                             | 108.50                            | 107.50                            | 106.50                           | 105.50                           | 104.50                          |
| 5+10     | 111.40                              | 110.40                             | 109.40                             | 108.40                            | 107.40                            | 106.40                           | 105.40                           | 104.40                          |
| 5+20     | 111.30                              | 110.30                             | 109.30                             | 108.30                            | 107.30                            | 106.30                           | 105.30                           | 104.30                          |
| 5+30     | 111.20                              | 110.20                             | 109.20                             | 108.20                            | 107.20                            | 106.20                           | 105.20                           | 104.20                          |
| 5+40     | 111.10                              | 110.10                             | 109.10                             | 108.10                            | 107.10                            | 106.10                           | 105.10                           | 104.10                          |
| 5+50     | 111.00                              | 110.00                             | 109.00                             | 108.00                            | 107.00                            | 106.00                           | 105.00                           | 104.00                          |
| 5+60     | 110.90                              | 109.90                             | 108.90                             | 107.90                            | 106.90                            | 105.90                           | 104.90                           | 103.90                          |
| 5+70     | 110.80                              | 109.80                             | 108.80                             | 107.80                            | 106.80                            | 105.80                           | 104.80                           | 103.80                          |
| 5+80     | 110.70                              | 109.70                             | 108.70                             | 107.70                            | 106.70                            | 105.70                           | 104.70                           | 103.70                          |
| 5+90     | 110.60                              | 109.60                             | 108.60                             | 107.60                            | 106.60                            | 105.60                           | 104.60                           | 103.60                          |
| 6+00     | 110.50                              | 109.50                             | 108.50                             | 107.50                            | 106.50                            | 105.50                           | 104.50                           | 103.50                          |
| 6+10     | 110.40                              | 109.40                             | 108.40                             | 107.40                            | 106.40                            | 105.40                           | 104.40                           | 103.40                          |
| 6+20     | 110.30                              | 109.30                             | 108.30                             | 107.30                            | 106.30                            | 105.30                           | 104.30                           | 103.30                          |
| 6+30     | 110.20                              | 109.20                             | 108.20                             | 107.20                            | 106.20                            | 105.20                           | 104.20                           | 103.20                          |
| 6+40     | 110.10                              | 109.10                             | 108.10                             | 107.10                            | 106.10                            | 105.10                           | 104.10                           | 103.10                          |
| 6+50     | 110.00                              | 109.00                             | 108.00                             | 107.00                            | 106.00                            | 105.00                           | 104.00                           | 103.00                          |
| 6+60     | 109.90                              | 108.90                             | 107.90                             | 106.90                            | 105.90                            | 104.90                           | 103.90                           | 102.90                          |
| 6+70     | 109.80                              | 108.80                             | 107.80                             | 106.80                            | 105.80                            | 104.80                           | 103.80                           | 102.80                          |
| 6+80     | 109.70                              | 108.70                             | 107.70                             | 106.70                            | 105.70                            | 104.70                           | 103.70                           | 102.70                          |
| 6+90     | 109.60                              | 108.60                             | 107.60                             | 106.60                            | 105.60                            | 104.60                           | 103.60                           | 102.60                          |
| 7+00     | 109.50                              | 108.50                             | 107.50                             | 106.50                            | 105.50                            | 104.50                           | 103.50                           | 102.50                          |
| 7+10     | 109.40                              | 108.40                             | 107.40                             | 106.40                            | 105.40                            | 104.40                           | 103.40                           | 102.40                          |
| 7+20     | 109.30                              | 108.30                             | 107.30                             | 106.30                            | 105.30                            | 104.30                           | 103.30                           | 102.30                          |
| 7+30     | 109.20                              | 108.20                             | 107.20                             | 106.20                            | 105.20                            | 104.20                           | 103.20                           | 102.20                          |
| 7+40     | 109.10                              | 108.10                             | 107.10                             | 106.10                            | 105.10                            | 104.10                           | 103.10                           | 102.10                          |
| 7+50     | 109.00                              | 108.00                             | 107.00                             | 106.00                            | 105.00                            | 104.00                           | 103.00                           | 102.00                          |
| 7+60     | 108.90                              | 107.90                             | 106.90                             | 105.90                            | 104.90                            | 103.90                           | 102.90                           | 101.90                          |
| 7+70     | 108.80                              | 107.80                             | 106.80                             | 105.80                            | 104.80                            | 103.80                           | 102.80                           | 101.80                          |
| 7+80     | 108.70                              | 107.70                             | 106.70                             | 105.70                            | 104.70                            | 103.70                           | 102.70                           | 101.70                          |
| 7+90     | 108.60                              | 107.60                             | 106.60                             | 105.60                            | 104.60                            | 103.60                           | 102.60                           | 101.60                          |
| 8+00     | 108.50                              | 107.50                             | 106.50                             | 105.50                            | 104.50                            | 103.50                           | 102.50                           | 101.50                          |
| 8+10     | 108.40                              | 107.40                             | 106.40                             | 105.40                            | 104.40                            | 103.40                           | 102.40                           | 101.40                          |
| 8+20     | 108.30                              | 107.30                             | 106.30                             | 105.30                            | 104.30                            | 103.30                           | 102.30                           | 101.30                          |
| 8+30     | 108.20                              | 107.20                             | 106.20                             | 105.20                            | 104.20                            | 103.20                           | 102.20                           | 101.20                          |
| 8+40     | 108.10                              | 107.10                             | 106.10                             | 105.10                            | 104.10                            | 103.10                           | 102.10                           | 101.10                          |
| 8+50     | 108.00                              | 107.00                             | 106.00                             | 105.00                            | 104.00                            | 103.00                           | 102.00                           | 101.00                          |
| 8+60     | 107.90                              | 106.90                             | 105.90                             | 104.90                            | 103.90                            | 102.90                           | 101.90                           | 100.90                          |
| 8+70     | 107.80                              | 106.80                             | 105.80                             | 104.80                            | 103.80                            | 102.80                           | 101.80                           | 100.80                          |
| 8+80     | 107.70                              | 106.70                             | 105.70                             | 104.70                            | 103.70                            | 102.70                           | 101.70                           | 100.70                          |
| 8+90     | 107.60                              | 106.60                             | 105.60                             | 104.60                            | 103.60                            | 102.60                           | 101.60                           | 100.60                          |
| 9+00     | 107.50                              | 106.50                             | 105.50                             | 104.50                            | 103.50                            | 102.50                           | 101.50                           | 100.50                          |
| 9+10     | 107.40                              | 106.40                             | 105.40                             | 104.40                            | 103.40                            | 102.40                           | 101.40                           | 100.40                          |
| 9+20     | 107.30                              | 106.30                             | 105.30                             | 104.30                            | 103.30                            | 102.30                           | 101.30                           | 100.30                          |
| 9+30     | 107.20                              | 106.20                             | 105.20                             | 104.20                            | 103.20                            | 102.20                           | 101.20                           | 100.20                          |
| 9+40     | 107.10                              | 106.10                             | 105.10                             | 104.10                            | 103.10                            | 102.10                           | 101.10                           | 100.10                          |
| 9+50     | 107.00                              | 106.00                             | 105.00                             | 104.00                            | 103.00                            | 102.00                           | 101.00                           | 100.00                          |
| 9+60     | 106.90                              | 105.90                             | 104.90                             | 103.90                            | 102.90                            | 101.90                           | 100.90                           | 99.90                           |
| 9+70     | 106.80                              | 105.80                             | 104.80                             | 103.80                            | 102.80                            | 101.80                           | 100.80                           | 99.80                           |
| 9+80     | 106.70                              | 105.70                             | 104.70                             | 103.70                            | 102.70                            | 101.70                           | 100.70                           | 99.70                           |
| 9+90     | 106.60                              | 105.60                             | 104.60                             | 103.60                            | 102.60                            | 101.60                           | 100.60                           | 99.60                           |
| 10+00    | 106.50                              | 105.50                             | 104.50                             | 103.50                            | 102.50                            | 101.50                           | 100.50                           | 99.50                           |

**COMISION NACIONAL DEL AGUA**  
**AGENCIA ESTADAL LEONA - SANTIAGO**  
**CERREJIA ESTADAL GUANAJUATO**  
**RESERVA GENERAL, PROYECTO 1300**

PERFILES METEOROLOGICOS DEL RIO GUANAJUATO PARA CUANTOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, RECONSTRUCCION DE PLANTILLA Y SECCION TRANSVERSAL.

ESTADAL ESTADAL

REDA: PLANO 1 DE 1

ESCALA GRAFICA HORIZONTAL  
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 METROS  
 ESC. 1:1000

ESCALA GRAFICA VERTICAL  
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 METROS  
 ESC. 1:100

**SIMBOLOGIA**

ELEVACION DEL AGUA T=1000 AÑOS \_\_\_\_\_

ELEVACION DEL AGUA T=500 AÑOS \_\_\_\_\_

ELEVACION DEL AGUA T=100 AÑOS \_\_\_\_\_

ELEVACION DEL AGUA T=50 AÑOS \_\_\_\_\_

BORDE EQUIVOCADO \_\_\_\_\_

PERIODO OFICIAL \_\_\_\_\_

PLANTILLA NATURAL \_\_\_\_\_

PLANTILLA DE DISEÑO \_\_\_\_\_

**NOTAS**

COEFICIENTE DE RUJOSIDAD  $n = 0.030$

PERIODOS DE RETORNO PARA :

T = 50 100 500 y 1000 AÑOS

### III.2.- ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

“Se comprende bajo el nombre genérico de taludes cualesquiera superficies inclinadas respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra”<sup>3</sup>. Cuando el talud se produce sin intervención humana, se denomina talud natural o simplemente ladera. Los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes).

En el análisis de estabilidad de los taludes, la mayor dificultad radica generalmente en la selección de parámetros de resistencia representativos. La aproximación de un análisis de estabilidad de talud depende de la precisión con que se determinan las propiedades del suelo; sin embargo, la mayoría de las veces los parámetros del mismo no pueden ser obtenidos de manera confiable.

Los apartados siguientes describen en forma general los factores que intervienen en la estabilidad de un talud presentando los principales métodos de análisis que se han desarrollado para analizar la estabilidad de taludes. Estos métodos se fundamentan en las teorías de la mecánica del medio continuo y del equilibrio límite, y son afectados en cada caso por sus propias hipótesis y limitaciones. Finalmente se presenta el análisis de estabilidad de las secciones críticas ya descritas en el capítulo II, utilizando el método sueco.

#### III.2.1.- Factores que Afectan la Estabilidad de Taludes.

Los principales factores que intervienen en la estabilidad de un talud son:

- a) Impacto natural: acción del agua (erosión, infiltración, capilaridad, nivel freático), sismo, movimientos tectónicos, influencia de la temperatura, efectos químicos, efectos biológicos.
- b) Impacto artificial: cargas, efectos dinámicos, insuficiencia del drenaje.

<sup>3</sup> Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A. *Mecánica de Suelos*. Tomo II. Teoría y aplicación de la mecánica de suelos Editorial Limusa 1996.p.255

La estabilidad depende principalmente de la geometría del talud y de la resistencia al corte de la masa de suelo.

Los taludes naturales o artificiales pueden presentar una amplia variedad de fallas, la tabla 13 presenta un resumen de los diferentes tipos, así como una breve descripción:

*Tabla 13. Tipo de Falla en Taludes.*

|  |   |
|--|---|
| A) Fallas ligadas a la estabilidad de laderas naturales.         | a) Deslizamiento superficial asociada a falta de resistencia por baja presión de confinamiento (creep).<br>b) Fallas asociadas a proceso de deformación acumulativa, generalmente relacionadas con perfiles geológicos desfavorables.<br>c) Flujos (en materiales secos y húmedos). |
| B) Fallas relacionadas a la estabilidad de laderas artificiales. | a) Deslizamiento rotatorios (local, de pie y de base).<br>b) Deslizamiento de traslación.<br>c) Falla con superficies compuestas.<br>d) Fallas múltiples.   |
| C) Derrumbes y caídos  | a) Movimiento de desprendimiento.   |
| D) Otros tipos de fallas.  | a) Fallas por erosión.<br>b) Fallas por tubificación.<br>c) Fallas por agrietamiento.   |
| E) Fallas por licuación.   | a) Disminución general de esfuerzos efectivos entre partículas.   |
| F) Falla por deformación en los hombros de los terraplenes.      | a) Deformación excesiva en los hombros de los taludes   |

En general, las fallas en los taludes se inician debido a variaciones de condición, por ejemplo un cambio en lluvia (como es el caso del presente estudio), drenado, carga por estabilidad superficial (por ejemplo, por eliminación

de vegetación). Estos cambios pueden presentarse inmediatamente después de la construcción con lentitud a lo largo de algunos años, o bien súbitamente.

### III.2.2.- Evaluación de Estabilidad de Taludes.

“En términos generales, hay cinco etapas para evaluar la estabilidad de taludes”<sup>4</sup>.

1. Caracterización del sitio. Se refiere a la determinación de las condiciones geológicas, sísmicas e hidrológicas que actúan en el sitio.
2. Identificación del modo de ruptura probable: caídos, deslizamientos y flujos.
3. Caracterización del material. Es lo referente al proceso de la prueba *in situ*, muestreo y pruebas de laboratorio de los materiales a fin de determinar las resistencias, deformabilidad y permeabilidad.
4. Caracterización de la presión de poro (no se emplea para análisis en términos de esfuerzos totales).
5. Evaluación de la estabilidad mediante un modelo analítico o numérico.

En la práctica, las etapas 1 a 4 son las que presentan mayores limitaciones, porque al no obtenerse de manera confiable estos parámetros se corre el riesgo de que la 5ª fase no arroje resultados confiables de estabilidad.

### III.2.3.- Condiciones de los Análisis de Estabilidad y Resistencia al Corte.

En los análisis de estabilidad de taludes deben tomarse en cuenta las condiciones en las que se requiere evaluar la seguridad (corto o largo plazo) y a la resistencia disponible de acuerdo con las condiciones de drenaje en el campo correspondientes.

---

<sup>4</sup> Morgenstern N R. *Stability and performance of slopes and embankments-II*. Geotechnical Special Publication No.31. (1992) Vol. 1. p. 2

“La tabla 14 se resumen los principales factores a considerar para la elección de las condiciones de análisis y las resistencias al corte”<sup>5</sup>.

Tabla 14. Resistencia al Corte, Presiones de Agua y Pesos Volumétricos Para el Análisis de Estabilidad de Taludes.

|   | Condición   |   |  |
|---|---|---|--|
|   | Fin de la construcción  | Carga multietapa*   | A largo plazo  |
| Procedimiento de análisis y resistencia al corte para suelos con drenaje libre. | Análisis de esfuerzos efectivos, usando $c'$ y $\phi'$ .  | Análisis de esfuerzos efectivos, usando $c'$ y $\phi'$ .  | Análisis de esfuerzos efectivos, usando $c'$ y $\phi'$ . |
| Procedimiento de análisis y resistencia al corte para suelos impermeables.      | Análisis de esfuerzos totales usando $c'$ y $\phi'$ desde pruebas <i>in situ</i> , UU, o CU   | Análisis de esfuerzos totales usando $S_u$ , desde pruebas CU y estimación de presión de la consolidación.  | Análisis de esfuerzos efectivos, usando $c'$ y $\phi'$ . |
| Presión de poro interna.  | No se emplea presión de poro interna para análisis de esfuerzos totales.<br>Utilizar $u$ obtenida a partir de análisis de flujo para análisis de esfuerzo efectivo. | No se emplea presión de poro interna para análisis de esfuerzos totales.<br>Utilizar $u$ obtenida a partir de análisis de flujo para análisis de esfuerzo efectivo. | Utilizar $u$ obtenida a partir de análisis de flujo.     |
| Presión de agua externa.  | Incluir.  | Incluir.  | Incluir.   |
| Peso volumétrico.   | Total.  | Total.  | Total.   |

\*La carga multietapa incluye vaciado rápido, construcción por etapas y cualquier otra condición en que, durante el período de consolidación, se lleve a cabo una serie de cambios en la carga bajo condiciones no drenadas.

En condiciones drenadas, los cálculos se realizan en términos de esfuerzos efectivos empleando valores de  $c'$  y  $\phi'$ . Estos parámetros se determinan a partir de pruebas drenadas o no drenadas con medición de presión de poro. La ejecución de pruebas triaxiales drenadas en arcillas es impráctico ya que las pruebas requieren demasiado tiempo en su realización. Las pruebas de corte directo o las pruebas CU con medición de presión de poro se usan frecuentemente debido a que el tiempo de ejecución es corto. Los valores  $c'$  y  $\phi'$

<sup>5</sup> Morgenstern N. R. *Idem.* p. 223

que se obtienen de las pruebas CU son prácticamente iguales a los valores determinados en pruebas triaxiales drenadas o de corte directo.

En condiciones no drenadas, los cálculos se realizan en términos de esfuerzos totales, ya que los valores de presión de poro en estas condiciones no pueden determinarse exactamente. Las resistencias al corte en condiciones no drenadas pueden evaluarse utilizando pruebas no consolidadas no drenadas (UU) o consolidadas no drenadas (CU).

#### III.2.4.- Tipos de Análisis.

“Los métodos de análisis de estabilidad de taludes en mecánica de suelos se dividen generalmente en dos grupos distintos”<sup>6</sup>:

- a) Análisis de esfuerzos y deformaciones.
- b) Análisis de equilibrio límite.

Los análisis en términos de *esfuerzo y deformaciones* se realizan frecuentemente empleando la teoría de elasticidad lineal o leyes de comportamiento más avanzadas que permiten tomar en cuenta, por ejemplo las deformaciones permanentes y la falla progresiva, es decir, la transición elástica-plástica desde el estado elástico inicial hasta el estado de falla último del suelo por flujo plástico.

Los análisis de equilibrio límite tratan con la condición de falla última de una masa de suelo. El objetivo de este tipo de análisis es la determinación de las cargas que pueden causar la falla de la masa de suelo. Las soluciones a estos problemas frecuentemente se obtienen por simple estática asumiendo superficies de falla de varias formas simples y usando el criterio de falla de Coulomb (comportamiento rígido-plástico). Este enfoque se conoce como *método de equilibrio límite* en mecánica de suelos.

<sup>6</sup> Chen W. F. and Liu X. L. *Limit analysis in soil mechanics*. Developments in Geotechnical Engineering Vol. 52. (1990) Edit. Elsevier

En el presente estudio se aplicó el análisis de equilibrio, este enfoque no toma en cuenta la relación esfuerzo-deformación del suelo y solamente considera las condiciones del equilibrio límite.

Las hipótesis básicas para el análisis de estabilidad de equilibrio límite son las siguientes:

1. Se considera como válido un análisis bidimensional, correspondiendo a un estado de deformación plana.
2. Se atribuye una forma determinada a la superficie de falla (plana, circular, irregular, compuesta o espiral logarítmica).
3. El movimiento de la masa de suelo es de cuerpo rígido, considerando así un estado de equilibrio estático.
4. El suelo es isótropo en cuanto a su resistencia al esfuerzo cortante.
5. Se considera válida la ley de resistencia de Mohr-Coulomb.
6. Se acepta que, en el momento de la falla, la resistencia al cortante del suelo se moviliza completamente y en forma simultánea en todos los puntos de la superficie de deslizamiento.
7. El factor de seguridad,  $F_s$ , se define como la relación entre la resistencia media al esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla y los esfuerzos cortantes actuantes medios en dicha superficie.

Los análisis de estabilidad de taludes, como los de capacidad de carga y empujes de tierra, tienen como principal objetivo la determinación del factor de seguridad respecto a la rotura, y su solución se obtiene comparando dos conjuntos de fuerzas o momentos: las que tienden a producir la rotura y las que tienden a impedirla.

Para evaluar la estabilidad de un talud se puede acudir a dos enfoques: los análisis límite o deterministas (ya descritos) y los análisis probabilistas; en el primer caso como ya se mencionó se consideran las propiedades medias del suelo, en el segundo caso se toman en cuenta las incertidumbres existentes en la

determinación de tales propiedades. Los análisis probabilistas consideran la variabilidad espacial y pueden conducir a diseños más realistas, puesto que hacen referencia a las condiciones existentes en el campo:

c) Análisis probabilistas.

Los *métodos probabilistas* se basan en las incertidumbres estadísticas y sistemáticas involucradas en la selección de parámetros de diseño, permiten estimar la probabilidad de falla de la obra (o su complemento a la unidad: la confiabilidad), además de hacer una evaluación racional del factor de seguridad durante y después de la construcción.

Los modelos probabilistas de taludes se pueden clasificar con base a:

1. Los tipos de incertidumbre que incluyen en el modelo.
2. El enfoque empleado para simular la distribución de probabilidad de el factor de seguridad, el margen de seguridad o el utilizado para calcular la probabilidad de falla.
3. La hipótesis de que el suelo se considere como un medio homogéneo o de que se tome en cuenta la variabilidad espacial.
4. La consideración de que la masa de falla potencial sea verdaderamente tridimensional a la aproximación más simple de que el problema se pueda considerar como bidimensional.
5. La consideración, o no, de la falla progresiva.
6. La consideración de falla sucesiva dentro del talud.
7. El grado en el cual el riesgo puede actualizarse con base a datos observados.
8. La manera de definir la superficie crítica de deslizamiento dentro del talud.

### III.2.5.- Métodos de Análisis de Estabilidad Prácticos.

“Muchos métodos para analizar la estabilidad de los taludes han sido desarrollados. Los métodos que con más frecuencia se utilizan en problemas prácticos se observan en la tabla 15”<sup>7</sup>.

Tabla 15. Características de equilibrio de algunos métodos de análisis de estabilidad de taludes  
(Duncan and Wright, 1980)

| METODO   | CARACTERISTICAS   |
|--|---|
| Gráficas de estabilidad de taludes (Janbu 1968, Duncan et al 1987) | Suficientemente exacto para muchos propósitos.<br>Rápido para programarlo en computadora.<br>Únicamente para superficies de deslizamiento circulares.<br>No satisface las ecs. de equilibrio de fuerzas horizontales.                   |
| Método ordinario de las dovelas (Fellenius 1927)                   | Sólo acepta la superficie de deslizamientos circulares.<br>Satisface el equilibrio de momentos.<br>No satisface el equilibrio de fuerzas horizontales.  |
| Método de Bishop modificado (Bishop 1955)                          | Sólo acepta superficies de falla circulares.<br>Satisface el equilibrio de momentos y fuerzas verticales<br>No satisface el equilibrio de fuerzas horizontales.   |
| Método de equilibrio de fuerza (ej. Lowe y Karafiath, 1960)        | Cualquier forma de superficie de deslizamiento.<br>No satisface el equilibrio de momentos.<br>Satisface el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales.   |
| Procedimiento generalizado de Janbu de las dovelas (Janbu, 1968)   | Cualquier forma de superficie de deslizamiento.<br>Satisface todas las condiciones de equilibrio.<br>Permite la variación de la posición de las fuerzas laterales entre dovelas<br>Problemas numéricos más frecuentes que otros métodos |
| Método de Morgenstern y Price (Morgenstern y Price, 1965)          | Cualquier forma de superficie de deslizamiento.<br>Satisface todas las condiciones de equilibrio.<br>Permite variar la orientación de las fuerzas laterales entre dovelas.  |
| Método de Spencer (Spencer, 1967)                                  | Cualquier forma de superficie de deslizamiento.<br>Satisface todas las condiciones de equilibrio.<br>Se supone que las fuerzas laterales son paralelas.   |

<sup>7</sup> Morgenstern N. R. *Idem.* pp. 226, 227

Para evaluar la precisión de los diversos métodos, se comparan los factores de seguridad entre diferentes métodos de solución para una misma superficie de deslizamiento. Los métodos más sencillos como el de Bishop , el de la cuña e incluso el método de ordinario de las dovelas, dan factores de seguridad con un intervalo de confianza de  $\pm 10\%$  respecto a los parámetros de resistencia supuestos (Lambe y Whitman, 1991). Considerando lo anterior y atendiendo la recomendación de la CNA, se utilizó el Método Sueco.

### III.2.6.- Aplicación del Método Sueco.

Considerando los niveles de terminación de la corona de los bordos, los tirantes de agua obtenidos del estudio hidrológico, la topografía de los sitios en que se definieron las secciones críticas o de interés, se analizaron cinco secciones a lo largo del tramo del río, respetando las secciones hidráulicas, pendientes de los bordos y alturas que arrojó en cada tramo el estudio correspondiente, además de los resultados de los ensayos índice y mecánicos de los materiales que actualmente constituyen los bordos y los propuestos en la adecuación.

En la revisión de la estabilidad de los taludes se tomó en cuenta que éstos ya están construidos, las propiedades índice y mecánicas del material que actualmente los forma, y en caso de requerir el reforzamiento de las paredes, ésta se hará con material procedente de alguno de los bancos estudiados, o con materiales que al menos tengan las características de los analizados en el presente estudio.

El análisis de estabilidad se llevó a cabo empleando el método sueco, que considera que la falla se deberá al deslizamiento por gravedad (y otras secciones externas en su caso), de una masa de suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento circular crítica, por medio del cálculo de un factor de seguridad que determina la posibilidad de ocurrencia de falla, aplicando la siguiente expresión:

$$F_s = M_R / M_m$$

donde:

- $F_s$  Factor de seguridad para la condición analizada  
 $M_R$  Momento resistente que representa la oposición al deslizamiento de la masa de suelo dentro del círculo crítico, función de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo en la línea de falla.  
 $M_m$  Momento motor, que provoca el movimiento del suelo debido al efecto de su propio peso y acciones adicionales

### III.2.6.1.- Localización del Círculo Crítico.

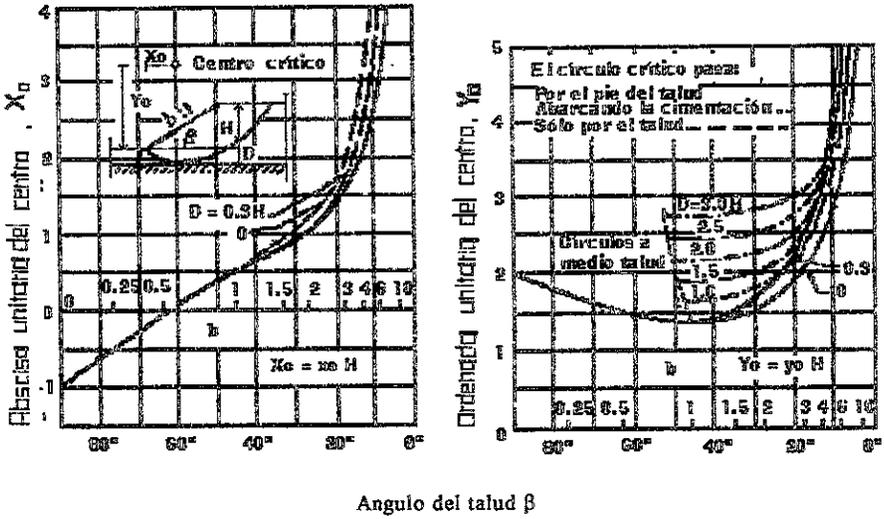
El círculo de deslizamiento crítico es aquel en el cual el factor de seguridad calculado tiene el valor más bajo, este factor de seguridad mínimo es el criterio que se requiere para el diseño. La localización del círculo de deslizamiento crítico puede calcularse de dos maneras:

- a) Con un método de aproximaciones sucesivas, usar un número razonable de círculos de deslizamiento de prueba.
- b) Usar una regla empírica para prescribir un círculo crítico supuesto y fijar el factor de seguridad límite a un valor suficientemente alto que toma en cuenta las imperfecciones del procedimiento.

El enfoque de aproximaciones sucesivas toma la variación de tres parámetros geométricos: la posición del centro, el radio y la distancia de intersección enfrente del pie. Para lograr una confiabilidad aceptable, se tienen que hacer muchas pruebas.

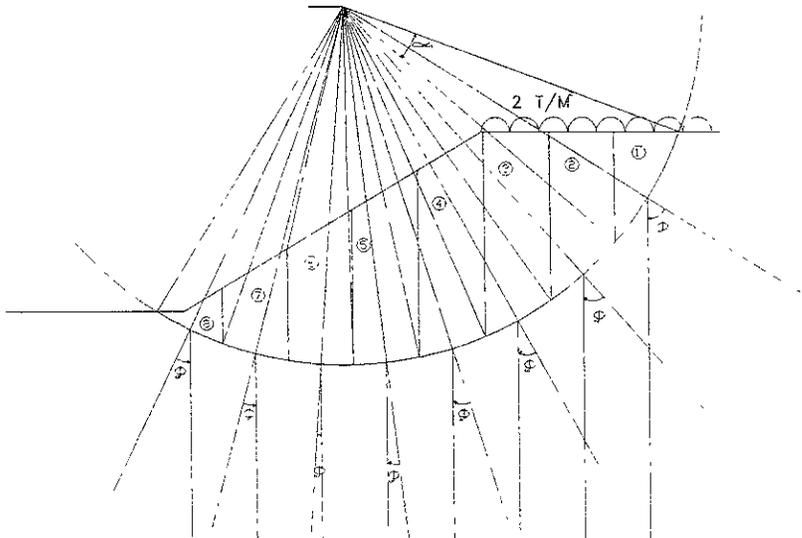
El comportamiento de los círculos de deslizamiento no es aleatorio, por lo contrario, existen modelos definidos. Por ejemplo, cuando el ángulo de fricción es mayor a  $3^\circ$ , el círculo crítico pasa a través del pie del talud. Este es también el caso cuando, cualquiera que sea el valor de  $\phi$ , el ángulo del talud es superior a  $53^\circ$ . La figura 18 muestra dos gráficas a partir de las cuales se puede localizar el centro del círculo crítico.

fig. 18 Localización del Centro del Circulo Critico.



III.2.6.2.- Metodología de Cálculo.

Con base a la gráfica 18, se localizó el centro del círculo crítico de la sección "C", y se trazo de la siguiente forma:



## ANALISIS DE ESTABILIDAD PARA LA SECCION "C"

| DOVELA | AREA (m <sup>2</sup> ) | ω (ton) | θ (°C) | ω SENθ | ℓ (m) | c * ℓ | ω COSθ TAN φ |
|--------|------------------------|---------|--------|--------|-------|-------|--------------|
| 1      | 4.77                   | 11.83   | 57.5   | 9.98   | 4.40  | 11.44 | 1.59         |
| 2      | 10.61                  | 20.95   | 41     | 13.74  | 2.93  | 7.62  | 3.94         |
| 3      | 13.92                  | 26.12   | 28.5   | 12.46  | 2.51  | 6.53  | 5.72         |
| 4      | 14.59                  | 22.75   | 17     | 6.65   | 2.30  | 5.99  | 5.43         |
| 5      | 12.60                  | 19.65   | 7      | 2.39   | 2.20  | 5.72  | 4.86         |
| 6      | 9.61                   | 15.00   | -5     | -1.31  | 2.20  | 5.72  | 3.72         |
| 7      | 5.97                   | 9.31    | -15    | -2.41  | 2.30  | 5.99  | 2.24         |
| 8      | 1.64                   | 2.55    | -27    | -1.16  | 2.51  | 6.53  | 0.57         |
| SUMA   |                        |         |        | 40.36  |       | 55.54 | 28.07        |

## TALUD

$$C = 2.6 \text{ ton/m}^3$$

$$\alpha_1 = 21^\circ \quad \alpha_5 = 10.5^\circ \quad \ell = (\alpha * R * \pi) / 180$$

$$\gamma_{sat} = 1.56 \text{ ton/m}^3$$

$$\alpha_2 = 14^\circ \quad \alpha_6 = 10.5^\circ$$

$$\phi = 14$$

$$\alpha_3 = 12^\circ \quad \alpha_7 = 11^\circ$$

$$\beta = 31^\circ$$

$$\alpha_4 = 11^\circ \quad \alpha_8 = 12^\circ$$

$$F.S. = ((c * \ell) + \omega \cos \theta \tan \phi) / \omega \sin \theta$$

$$F.S. = 2.07$$

En la tabla siguiente se reportan los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de las secciones críticas:

| SECCION | ALTURA DEL BORDO (m) | ANGULO "β" (°C) | RADIO (m) | F.S. |
|---------|----------------------|-----------------|-----------|------|
| C       | 6                    | 31              | 12        | 2.07 |
| F       | 6                    | 29              | 12        | 1.47 |
| I       | 6                    | 29              | 12        | 1.77 |
| J       | 7                    | 31              | 14        | 6.89 |
| L       | 7                    | 36              | 12.6      | 1.28 |

De acuerdo con los resultados obtenidos se considera que los taludes propuestos son aceptables en cuanto a estabilidad, aun en los factores bajos, ya que no se considero la cuffa de presión del agua.

### III.3.- TERRAPLENES.

Los aspectos que se incluyen en esta sección, se refieren en especial al terraplén del cauce, y en particular a los requisitos que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para que la obra sea estable e impermeable.

El procedimiento constructivo del terraplén del cauce debe contemplar las dos etapas siguientes:

- PRIMERA ETAPA. Las actividades que se realizarán son: limpieza de la superficie de desplante, colocación y compactación al 95% de la prueba proctor, con un contenido de agua igual al óptimo + 2%, con objeto de que el terraplén se comporte en forma dúctil, el espesor de las capas se hará de 20 cm.
- SEGUNDA ETAPA. Esta segunda etapa se iniciara con una escarificación de la parte superior del terraplén; con el fin de asegurar la liga de los materiales impermeables que se colocaran hasta la altura de diseño.

Para evitar problemas futuros en el funcionamiento del cauce, se debe ir comprobando la calidad del mismo en distintos tramos de cada capa tendida. Para ello, durante la construcción se deben determinar y controlar sistemáticamente los valores de: contenido de humedad, peso volumétrico seco de campo y grado de compactación.

En general, se deben realizar pruebas de compactación a cada capa compactada, llevando el registro de la historia de la obra en construcción, tanto para conocer la calidad de la misma, como para determinar todas aquellas zonas del terraplén que no cumplan con las especificaciones requeridas y que por lo tanto sea necesaria su recompactación.

## CAPÍTULO IV

### PLANEACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE OBRA

En este capítulo se describen brevemente los lineamientos generales que se deben de contemplar en la interrelación de diversas disciplinas, involucradas en el diseño, planeación y ejecución de una obra. Esto es una tendencia inevitable que presenta nuevos retos para el ingeniero geotécnico y constructor.

El diseño geotécnico no necesariamente resulta adecuado para definir el proceso constructivo, ya que pueden pasarse por alto las incertidumbres potenciales, especialmente aquéllas involucradas con los riesgos geológicos y sus consecuencias en la construcción, por lo que primeramente se debe determinar el problema para entonces encontrar alternativas y así alcanzar la mejor solución, tales actitudes fomentan y motivan la interacción de las etapas que a continuación se describen.

Cabe mencionar que el presente análisis preliminar debe retroalimentarse para cuando se lleve a cabo las correcciones sean mínimas y se logre una obra de calidad.

#### IV.1.- PLANEACION.

La planeación es el enunciado de las actividades que constituyen el proceso y el orden en que debe efectuarse, estas actividades deben realizarse en gabinete o en campo y tienen como objetivo tomar en cuenta las siguientes tres consideraciones: ¿cómo?, ¿cuándo? y ¿porqué?.

Indistintamente de la técnica que se escoja para planear el proyecto, la decisión implicará recopilar tanta información como sea posible acerca de las siguientes partidas: materiales, maquinaria, fuerza de trabajo, dinero y tiempo.

Respecto a los materiales que se utilizarán en el recubrimiento de los taludes, ya se tienen seleccionados los bancos de materiales para la formación de los terraplenes y revestimiento, sólo falta conocer la disponibilidad de los terrenos donde se pretende explotar el material.

Como ya se describió en los capítulos I y II, la mayor parte del área en estudio se utiliza para fines agrícolas, razón por la cual se pueden presentar problemas en la adquisición del material. En el capítulo II se seleccionó como banco de material la zona que comprende en la represa La Garrida (Banco El Conejo), esta zona pertenece a la CNA, lo cual es una ventaja para el proyecto ya que abate los costos. Conviene señalar que la región se utiliza por los vecinos del lugar como zona de paso y pastoreo de ganado, por lo que es conveniente comentar a la comunidad de la importancia de la obra. En caso de ser insuficiente el volumen del banco El Conejo, se optará por los bancos Ceferino y La Ladera, los cuales no presentan aparentemente problema alguno para la explotación.

Respecto a las cuatro partidas restantes (maquinaria, fuerza de trabajo, dinero y tiempo), el constructor debe de contar con el equipo necesario para llevar a cabo la obra y contar con la fuerza de trabajo necesaria para no sufrir retraso alguno en la elaboración de los trabajos.

Para definir el programa de trabajo y el presupuesto base del encauzamiento del río Guanajuato, se tiene que emplear un análisis donde el proyecto se ejecute en forma tal que produzca la razón más alta de beneficio con respecto al costo, ya que es una obra pública.

Los puntos que deben considerarse en la planeación de la obra se muestran en el siguiente esquema:

|               |                         |  |
|---------------|-------------------------|--|
| I. PLANEACION | 1. lista de actividades | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Proyecto ejecutivo</li> <li>b) Permisos necesario para la construcción.</li> <li>c) Disponibilidad de recursos económicos.</li> <li>d) Procedimientos constructivo y alternativas.</li> <li>e) Equipo de construcción.</li> <li>f) Conocimiento integral del mercado</li> <li>g) Suministro de materiales.</li> <li>h) Previsión de recursos humanos.</li> <li>i) Accesos provisionales.</li> <li>j) Evaluación de costos posibles finales.</li> </ul> |
|               | 2. Tabla de secuencias  | <ul style="list-style-type: none"> <li>k) Limitación de espacios.</li> <li>l) Limitación de recursos.</li> <li>m) Limitación de responsable.</li> <li>n) Inmediata anterior.</li> <li>o) Simultánea.</li> <li>p) Inmediata posterior.</li> </ul>   |
|               | 3. Dibujo de diagramas  | <ul style="list-style-type: none"> <li>q) Programa de obra.</li> <li>r) Actividades reales.</li> <li>s) Actividades ficticias.</li> </ul>  |

#### IV.1.1.- Lista de Actividades.

En esta lista no se deben de olvidar los tiempos necesarios para proyectos y trámites indispensables para la ejecución actividades específicas de construcción.

#### IV.1.2.- Tabla de Secuencias.

En la tabla de secuencias se debe señalar que actividades son simultáneas, cuáles inmediatas anteriores y cuáles inmediatas posteriores, sin olvidar las limitaciones de espacio y de recursos, así como una muy importante, que es la

“decisión del responsable”, es decir, la orden que aún no teniendo a primera vista razón lógica, debe efectuarse de ese modo.

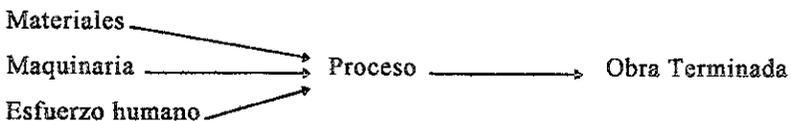
#### IV.1.3.- Dibujo de Diagrama.

El dibujo de diagramas proviene de las dificultades que afronta el planeador que decide el orden de las actividades. En el caso particular que nos ocupa (la adecuación del río Guanajuato), los conceptos de obra serán pocos pero de gran alcance en volumen por lo que su programación podrá ser incluso simultánea.

#### IV.2.- PROGRAMACION.

La programación es la elaboración de tablas o de gráficas que indiquen los tiempos de terminación, de iniciación y por consiguiente la duración de cada una de las actividades que conforman el proceso, en forma independiente.

Toda obra de construcción se presenta como una secuencia de varios procesos de transformación con una entrada, el empleo recursos y una salida, la obra terminada.



Es posible contar con uno o varios procesos que a su vez se subdividen en subprocesos, los cuales producirán una parte de la obra, estos suelen ser simultáneos o en cadena. Usualmente estos procesos se pueden analizar por separado, para definir los procedimientos de construcción que producirán la obra que se desca.



#### IV.2.3.- Tabla de Holguras.

Se definen a continuación los diferentes conceptos de holguras para comprende el propósito de la tabla.

- *Holgura total.*- es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin afectar la terminación de un proceso.
- *Holgura libre.*- es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin afectar la fecha primera de iniciación de las posteriores.
- *Holgura independiente.*- es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin afectar la fecha última de las anteriores y la fecha primera de las posteriores.

#### IV.2.4.- Análisis y Reducciones.

Para analizar el proceso, se debe estudiar las holguras con la finalidad de reducirlas o conservarlas según convenga. En caso de reducciones se tienen dos caminos, o modificar duraciones o modificar secuencias; la primera con más personal, con más equipo o con dobles turnos, y la segunda cambiando.

#### IV.2.5.- Programas de Protección Civil.

En el desarrollo del presente trabajo se observó que existe la necesidad de crear programas de protección civil para las poblaciones que se encuentran asentadas cerca de un cauce; para cuando se presente una emergencia como la analizada se permita movilizar personal y equipo mediante avisos inmediatos cuando sea necesario.

Un plan de acción para hacer frente a un fenómeno de está índole debe incluir los siguientes elementos:

1. Crear un sistema para recoger y analizar datos acerca de las condiciones atmosféricas del suelo y del camino.
2. Crear un sistema de comunicación entre los encargados de activar el plan de acción en caso de una tormenta excesiva.
3. Elaboración de planes organizativos y la definición de responsabilidades para prevenir y controlar los daños provocados por las tormentas excesivas.
4. Crear métodos para financiar y documentar los costos del equipo y personal; relación de personas autorizadas para utilizar las finanzas, el personal y el equipo.
5. Asignar números de teléfono para dar información al público y para establecer comunicación con los órganos encargados de velar por el cumplimiento de las leyes, y otros organismos públicos.
6. Crear medidas para el control de efectos de tormenta y para evitar los daños; reconocimiento y estimación del alcance de los daños sufridos por las estructuras y recursos.
7. Disposiciones para informar de los daños provocados por las tormentas excesivas.

Para cada situación se identificará un conjunto de actividades que van desde la observación, hasta la creación de patrullas y equipos de trabajos regionales.

Es importante crear una buena cultura de convivencia con la naturaleza, sobre todo a las poblaciones que viven en las márgenes de los cauces, ya que conscientemente los pobladores generan condiciones desfavorables para el mal funcionamiento hidráulico de los ríos; por ejemplo, crean veredas, son utilizados para descarga de aguas residuales, etc.

### IV.3.- CONSTRUCCION.

La construcción se define como uno o varios procesos de producción en el o los que se combinan en alguna forma recursos (materiales, obra de mano y maquinaria) para lograr una obra.

En el campo de la construcción, se materializan las ideas que el diseñador ha expresado a través de planos y especificaciones. Lo variado de las obras y problemas que se presentan durante la construcción, obligan al especialista en esta área a tener una preparación completa en todas las ramas de la ingeniería civil.

Para no sufrir algún contratiempo en la adecuación del río se sugieren los siguientes puntos:

- Construcción de accesos.
- Trazo de proyecto.
- Identificación de bancos.
- Apertura de bitácoras.
- Certificación de distancias de acarreo.
- Nivelación y seccionamiento del terraplén en construcción.

### IV.4.- CONTROL DE OBRA.

Este último apartado tiene como propósito hacer notar la diferencia entre planeación y programación para dar pauta al control.

Planeación      —————→ Algo general  
Programación    —————→ Algo fijo en el tiempo

La diferencia entre estas dos etapas es el tiempo; de no controlarse no tiene sentido las etapas de planeación y control, por lo que las tres deben de estar interrelacionadas.

El control de obra se realiza mediante la elaboración de tablas o gráficas que permiten conocer las consecuencias de un atraso o de un adelanto en cualquier actividad de un proceso, y tomar las correspondientes decisiones.

El control típico de un proyecto incluye dos funciones principales, vigilancia y actualización. La vigilancia implica retroalimentación de calidad del proyecto para saber qué es lo que está sucediendo, es decir, en que punto se encuentra el proyecto, cómo llego a dicho punto y el pronóstico para lo que vendrá.

La vigilancia permite además al administrador de la construcción determinar el avance de obra y predice la probabilidad de cumplir con el programa planeado. Cuando mediante esta metodología se determina que se sobrepasará el costo y el tiempo de ejecución señalados, el plan se modifica o actualiza para ajustarse a los requerimientos del contrato.

Esta última etapa se divide en:

### III. CONTROL

1. Uso de holguras  
(Repartición de recursos)
2. Reducción de tiempos  
(Pendiente de costos)

#### IV.4.1.- Repartición de Recursos.

Si se dispone de holguras en las actividades, es lógico que se pueda desplazar éstas actividades de un programa de barras a su ubicación más conveniente y buscando que el personal no sea muy variable, o bien que las erogaciones no tengan máximos demasiados.

#### **IV.4.2.- Reducción de Tiempos en Función del Costo.**

Todo proceso constructivo produce dos clases de costos, costos indirectos y costos directos; siendo los primeros determinados por el funcionamiento de la empresa, y los segundos dependientes del tipo de obra de que se trate.

El buen desempeño de la obra, dependerá en gran medida de la construcción, la selección correcta del procedimiento y equipo, así como de la mano de obra y del control estricto durante todo el proceso, de ahí que surja la necesidad de la supervisión geotécnica para tener una buena conclusión de la obra.

## CONCLUSIONES

Dentro de la ingeniería geotécnica, siempre ha existido un factor común entre el proyectista y el constructor: *la incertidumbre*.

La incertidumbre en el diseño de un estudio como el que se presentó surge en la obtención de parámetros de resistencia representativos, ya que la mayoría de las veces éstos no pueden ser obtenidos de manera confiable, ya sea por carecer de datos, por existir una importante variabilidad espacial en sus propiedades o por las imprecisiones en las que se incurre en las pruebas de campo y de laboratorio; por lo que se deben dedicar suficientes recursos a las fases de exploración y diseño preliminar que aseguren la consideración de todas las posibles contingencias del sitio. Si esto se logra, entonces la construcción se vuelve más fácil y los costos y programas considerados pueden ser más realistas.

Una vez obtenidos los parámetros del suelo, se presentaron diferentes métodos de estabilidad de taludes, de los cuales se llega a las siguientes conclusiones:

- De los diversos métodos de análisis de equilibrio límite, el método de las dovelas es generalmente el más empleado en la práctica.
- Cuando se trate de un medio heterogéneo se aplicará el método de las dovelas.
- En el caso de que el medio sea homogéneo e isótropo, constituido por un talud entre dos superficies planas horizontales, se obtiene directamente el coeficiente de seguridad utilizando las gráficas de estabilidad de taludes de Janbu.
- En los análisis de estabilidad de taludes existen incertidumbres que influyen en la evaluación de la seguridad de estas estructuras. Los análisis probabilistas permiten tomar en cuenta tales incertidumbres, particularmente las asociadas a la variabilidad espacial de la resistencia al corte.

En el proyecto revisado se efectuó una recopilación exhaustiva referente al marco geológico, así como de las pruebas en campo y laboratorio que permitieron un buen conocimiento del suelo para fines de diseño y para especificar los materiales a emplear en la construcción de los bordos.

Con base en las características del material disponible en la zona se seleccionó el método de análisis de Fellenius para estudiar la estabilidad de taludes. Del análisis seleccionado se determinó que el factor de seguridad contra falla plástica de los bordos es cercano a la unidad; ello confirmó la precaria estabilidad de los bordos observada en varias secciones del río Guanajuato.

La solución proyectada consiste en revestir el río con el material de los bancos seleccionados, los cuales se recomendó colocar con una adecuada compactación para lograr una resistencia al esfuerzo cortante aceptable y disminuir los efectos de deformación.

De lo anterior conviene mencionar la importancia de asignar una supervisión geotécnica que se encargue de los siguientes aspectos:

- Verificación de condiciones de obra
- Procedimiento constructivo
- Impacto ambiental
- Especificaciones
- Pruebas verificativas
- Seguridad

Se hace especial énfasis en una supervisión geotécnica debido a los problemas derivados del río en estudio ya que a lo largo de la historia del municipio, el río Guanajuato ha presentado continuamente desastres catastróficos, tanto en el sector agrícola como en el sector industrial, y más aun

al problema que en la actualidad confronta la población que se ha venido asentando a lo largo de la margen del cauce.

El aspecto más importante en el campo de la geotécnica, tanto de proyecto como de construcción, es conducirse en un ambiente de trabajo de grupo buscando una meta común. La meta debe ser un producto final satisfactorio, que se comporte como fue predicho, construido en un lapso determinado a un costo estimado. Tal actitud fomenta y motiva la interacción de las demás áreas de la Ingeniería Civil para proyectar una obra de calidad.

## BIBLIOGRAFIA

- Aparicio Mijares, Francisco J. Apuntes de Hidrología de Superficie. Facultad de Ingeniería. UNAM, 1987
- Cambefort Henry. Reconocimiento de Suelos y Cimentaciones Especiales. Ediciones Omega, 1967
- Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles Fascículo B.2.3. Estructuras de Tierra, México, 1979
- Comisión Nacional del Agua. Mecánica de Suelos (Instructivo Para el Ensayo de Suelos). C.N.A. México, 1991
- Chen W. F. and Liu X. L. Limit Analysis in Soil Mechanics Developments Geotechnical Engineerin, Vol. 52. Edit. Limusa, 1990
- Crespo Villalaz, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Editorial Limusa.
- Departamento de Construcción. Apuntes de Movimiento de Tierra. Facultad de Ingeniería. UNAM
- Fundación I.C.A. 40 Años de Investigación y Práctica en Geotécnia, Vol. III. I.C.A., 1997
- González Espindola, José Luis. Confiabilidad de Taludes, Análisis Tridimensional, U.N.A.M (tesis de maestría), 1998
- Harris Robert, B. Técnicas de Redes de Flecha y Precedencias Para Construcción. Editorial Limusa, 1983
- Herminier R. L. Mecánica del Suelo y Dimensionamiento de Firmes. Editorial Blume
- Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A. Mecánica de Suelos, Tomo I y II. Editorial Limusa, 1996
- Lambe William y Whitman Robert V. Mecánica de Suelos. Editorial Limusa, 1991
- Lázaro Lopéz Andrés. Manual de Hidráulica. Publicaciones de la Alicante, 1997

- Legget Robert F. y Karrow Paul F. **Geología Aplicada a la Ingeniería Civil**. Editorial Limusa, 1991
- Méndez Sánchez Ernesto. **Introducción al Proceso Constructivo**. Editoria FUNDEC A.C., 1989
- Morgenstern N. R. **Stability and Performance of Slopes and Embankments-II**. Geotechnical Sapecial Publication No. 31. Vol. I
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **Manual de Campo Para la Ordenación de Cuencas Hidrográficas, Diseño y construcción de Caminos en Cuencas Hidrográficas Frágiles**. Guía FAO, Roma, 1990
- Palacio de Minería. **La Mecánica de Suelos y la Geohidrología**. México D.F. 1985
- Peurifoy R. L **Placamiento y Equipos de Construcción**. Editorial Diana, 1981
- Puig de la Parra Juan B. **Geología aplicada a la Ingeniería Civil y Fotointerpretación**. Editorial Juventud, 1970
- Rico Rodríguez Alfonso y Hermilo Del Castillo. **La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Vol. II**. Editorial Limusa
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. **Manual Para Proyectos de Pequeñas Obras Hidráulicas Para Riego y Abrevadero**. México, 1980
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. **Normas Para Construcción e Instalaciones, Carreteras y Aeropistas. Terracerías, Libro 3, titulo 3.01.01**, México, 1984
- Secretaría General de Obras del D.D.F. **Manual de Exploración Geotécnica**. México D.F., 1988
- Secretaría de Programación y Presupuestos. **Síntesis Geográfica de Guanajuato**. S.P.P. México 1980
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. **Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes**. S.M.M.S. México, D.F., 1983

- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 2° Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas. S.M.M.S. México, D.F., 198
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. XVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (Zacatecas). México, 1992
- Suárez Salazar Carlos. Costo y Tiempo en Edificación. Editorial Limusa, 1994
- Terzaghi K. and Peck, R. B. Soil Mechanics in Engineering Hand Book. Edit. John Wiley and Sons, 1968
- Whitlow Roy. Fundamentos de Mecánica de Suelos. Editorial CECSA, 1998
- Zamora Millán Francisco. Instructivo de Laboratorio de Geotécnia. Facultad de Ingeniería. UNAM