CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua para los aproximadamente 3.5 millones de habitantes (INEGI, 1991) del área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, en fechas recientes, es una de las principales prioridades de las autoridades neoleonesas, ya que la demanda de agua es del orden de 15 m^3/s (DE LEÓN *et al.*, 1994).

Se han desarrollado estrategias para resolver el problema de abasto de agua y estas consisten en la exploración y explotación del agua subterránea. Dentro de las fuentes de agua subterránea se encuentran los pozos de Mina, sistema Santa Catarina (pozos Buenos Aires y galería Huasteca) y campo de pozos Monterrey, así como el sistema Santiago I (galerías Cola de Caballo y San Francisco), aportando en total 4.65 m^3/s (DE LEÓN *et al.*, 1994).

Las fuentes de aguas superficiales son las Presas: Rodrigo Gómez (La Boca), en Santiago, N.L, con un suministro promedio de 1.48 m^3/s; y José López Portillo (Cerro Prieto), en Linares, N.L., con un aporte de 2.61 m^3/s. En suma, el suministro de las fuentes anteriores es de 8.74 m^3/s, existiendo un déficit de 6.26 m^3/s (DE LEÓN *et al.*, 1994).

Con el fin de abatir este déficit se planeó la construcción de la Presa El Cuchillo-Solidaridad en el municipio de China, N.L. Su construcción inició en noviembre de 1990, concluyéndose en octubre de 1994, captando el agua de la cuenca del Río San Juan.

Los objetivos de la obra hidráulica en China, N.L., son: a) suministrar 10 m^3/s al área metropolitana de Monterrey, b) abastecer a las poblaciones aguas abajo de la obra, c) regular y controlar avenidas del Río San Juan protegiendo a más de 50,000 habitantes

CAPÍTULO 2
GENERALIDADES

2.1 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es determinar los posibles mecanismos de filtración que tienen lugar aguas abajo de la Presa El Cuchillo - Solidaridad (Dique y Cortina) mediante métodos geólogo - geofísicos, teniendo en cuenta la relación estrecha con el cambio en el nivel del agua en el Vaso de la Presa durante su llenado.

Los objetivos específicos que pretenden ser resueltos son:

- Evaluar el pronóstico de zonas de filtración realizado en 1992
- Estimar los mecanismos de filtración en el Dique de la Presa
- Actualizar el pronóstico de filtración y
- Optimizar la metodología de investigación para el estudio de fenómenos de filtración en Presas.

2.2 METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos antes mencionados se utilizó la siguiente metodología de trabajo:

- Análisis de datos geológicos, estructurales, hidrogeológicos y geofísicos anteriores al presente estudio
- Determinación de las condiciones geológicas del área (escala 1: 25,000)
- Censo de filtraciones, su ubicación y gastos
- Análisis químicos de las aguas de la Presa y de las filtraciones, así como de sus variaciones en el tiempo
- Aplicación de métodos geofísicos para determinar las propiedades físicas de las rocas y sus cambios relacionados con las variaciones del nivel del agua del Vaso de la Presa
- Cálculo de parámetros físicos de las rocas que tienen importancia hidrogeológica

- Evaluación del pronóstico de filtraciones obtenido en investigaciones previas
- Interpretación de los datos geofísicos e
- Integración de la información geofísica e hidrogeológica para determinar los posibles mecanismos de filtración

2.3 ESTUDIOS REALIZADOS

2.3.1 ANTERIORES AL PRESENTE TRABAJO

Existen algunos trabajos previos al presente, realizados en el área de la Presa El Cuchillo con fines hidrogeológicos. El primero, efectuado en 1979, con el objeto de determinar la factibilidad de construcción de la Presa, realizándose observaciones geológicas y pruebas físico - mecánicas (SARH, 1979). El segundo estudio se realizó a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA), con el fin de determinar la factibilidad de construcción de la Presa, realizándose análisis geológicos locales, búsqueda y caracterización de materiales para su construcción; además, estudios de permeabilidad de las rocas durante la construcción de la Cortina (CNA, 1993).

En 1992, investigadores de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la UANL y de la Universidad Estatal de Moscú, realizaron estudios geólogo-geofísicos en el sitio de construcción de la Presa El Cuchillo. La finalidad de sus estudios era pronosticar el surgimiento de riesgos geológicos - hidrogeológicos en el territorio adyacente a la Presa, como resultado del llenado y funcionamiento del Vaso. Estudios más detallados se efectuaron en el Dique natural Este de la obra (Loma Los Pozos) con el objeto de estimar la permeabilidad de las rocas (UANL-UEM, 1993 a,b).

NAVARRO (1996) ha mostrado los resultados de la integración de métodos hidrogeológicos para determinar la permeabilidad integral del macizo rocoso y los mecanismos de interacción en el sistema agua de la Presa–agua subterránea en la Loma Los Pozos.

2.3.2 ESTUDIOS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO

Los trabajos realizados, para esta investigación, consistieron en determinar las condiciones geológicas de las rocas en cuanto a su petrografía, porosidad, grado de fracturación y el tipo de acuífero que existía en el lugar. Por otro lado, mediante estudios geoquímicos se caracterizaron los diferentes tipos de aguas y su variación en el tiempo con el fin de determinar su posible origen y evolución. En cuanto a los métodos geofísicos, se realizaron estudios para determinar la distribución de la resistividad de las rocas y su variación temporal y así calcular su grado de saturación de agua. Integrando los resultados de los diferentes métodos se logró elaborar los mecanismos de filtración de las aguas del Vaso que tiene lugar en la Cortina y el Dique.

2.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para la presentación de los estudios realizados y de sus resultados, se ha dividido esta tesis en ocho capítulos. El primero, contiene una introducción sobre los objetivos de la construcción de la Presa; en el segundo presenta los objetivos y metodología para el presente estudio. En el tercero de ellos se presenta la ubicación y vías de acceso, lo referente al clima, vegetación y las características técnicas de la construcción del Dique y la Cortina de la Presa.

En el cuarto se muestra la geología regional y local, la petrografía y porosidad de las rocas y la geología estructural. En el quinto se presentan los estudios tendientes a la determinación de las características hidrogeológicas del área, basándonos en información piezométrica, química de las aguas y la distribución de las filtraciones. En el capítulo sexto se describen los estudios geofísicos realizados mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) y perfiles electromagnéticos con el fin de determinar la distribución de la resistividad de las rocas y su variación en el tiempo.

El capítulo séptimo se enfoca en el análisis de la información de los capítulos anteriores y describe el mecanismo de los procesos hidrogeológicos del área, principalmente en cuanto a las filtraciones. En el último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones fruto del este trabajo. Se presenta al final de la tesis la bibliografía y dos ANEXOS, el primero sobre datos de Sondeos Eléctricos Verticales y el segundo una Carta Geológico – Estructural del área de estudio.

CAPÍTULO 3
FISIOGRAFÍA

3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y VÍAS DE ACCESO

La Presa El Cuchillo se localiza a 102 km al Este de la Ciudad de Monterrey, en el municipio de China, Nuevo León (Fig. 3.1). Se ubica aguas arriba de la unión de los ríos San Juan y el Pesquería. El sitio de la Cortina se encuentra a 25° 43' latitud Norte y 99° 17' longitud Oeste, 3 km al NW de la población de China.

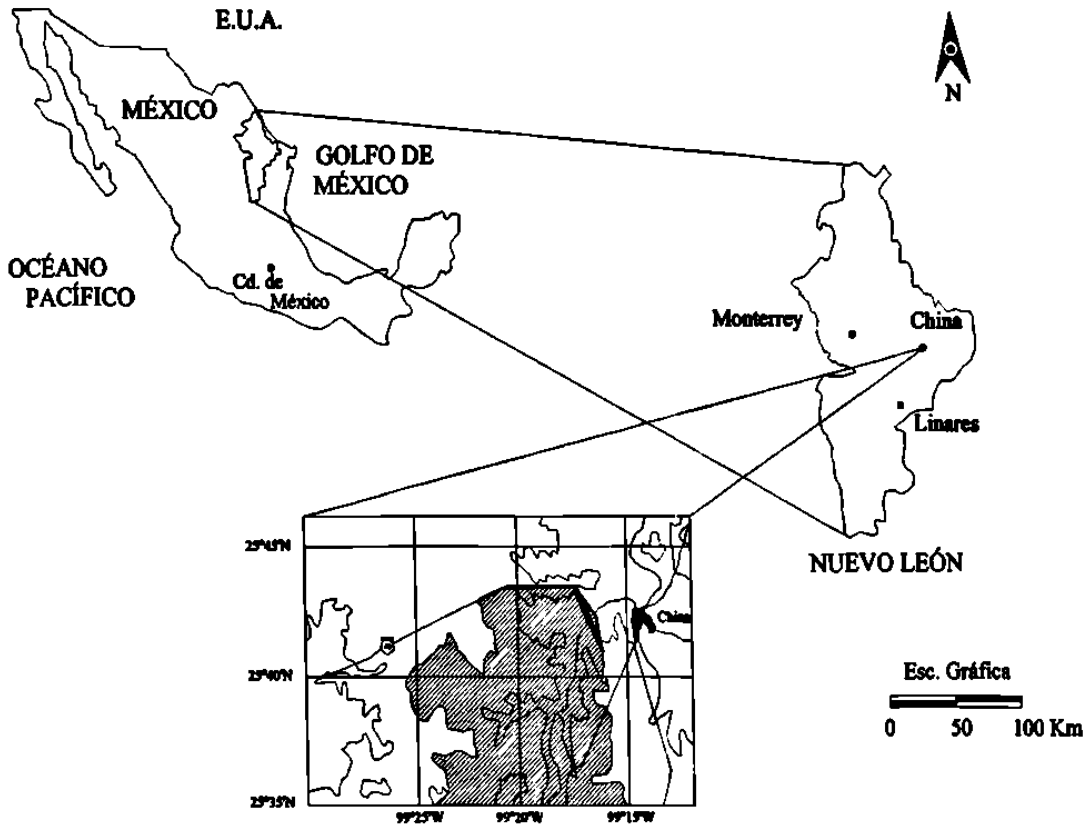

Figura 3.1 Ubicación del área de estudio (la zona achurada corresponde al Vaso).

Las vías de comunicación son: a) la carretera federal número 40 Monterrey-Reynosa, en el km 108 al sur (~1.5 km) está el acceso a la Cortina; b) La autopista Monterrey - Reynosa (cuota) y c) la carretera 48 Montemorelos-China. En la intersección del Dique con la Cortina se encuentra una explanada que se utiliza como helipuerto.

3.2 CLIMATOLOGÍA Y VEGETACIÓN DE LA REGIÓN

Del análisis de los datos obtenidos en la estación climatológica El Cuchillo se puede concluir que el clima de la región es seco, cálido, muy extremoso y con régimen de lluvias en los meses de mayo y junio, y los de agosto y septiembre. Según la clasificación de KÖPPEN (1936) y de acuerdo a las modificaciones de GARCÍA (1981), el tipo de clima es BSo(h')hx'(e'). La temperatura media anual es de 22°C con mínimas de 7°C en el mes de enero, y máximas de 37°C en el mes de julio. La precipitación media anual es de 537 mm y la evaporación media anual es de 2400 mm, siendo el mes de julio el de máximo valor de evaporación de 318.1 mm (CAVAZOS, 1994; NAVARRO, 1996).

Los suelos que existen en la región de estudio son del tipo xerosol háplico, regosol calcárico y vertisol crómico, todos de la clase de textura media. Para el primero la fase física es gravosa y el grado de desarrollo moderado, mientras que para los otros dos es lítica y el desarrollo débil. Los suelos tipo xerosol háplico se localizan en la parte Oeste y Sur de la región de estudio. Los suelos tipo regosol calcárico se encuentran en las partes altas topográficamente y se relacionan con las capas más gruesas de areniscas. El suelo vertisol crómico se encuentra en las partes bajas y a lo largo del arroyo Tinajas. Estos dos últimos tipos se distribuyen alternadamente en el resto de la región en bandas con rumbo Norte-Sur (INEGI, 1978).

La vegetación del área de estudio es del tipo matorral espinoso tamaulipeco y está comprendido por algunas leguminosas, gramíneas, euphoribiáceas, rhamnáceas y cactáceas. El matorral es utilizado como zona de pastoreo de ganado caprino y bovino, así como para obtener productos como leña, carbón y algunas plantas medicinales.

Las especies vegetales presentes en el área son cenizo (*Leucophyllum frutescens*), chaparro prieto (*Acacia Regidula*), tasajillo (*Opuntia leptocaulis*), guayacán (*Porlieria angustifolia*), coyotillo (*Karwinskia humboltiana*), salvia (*Croton torreyllanus*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), sangre de dragón (*Jatropha dioica*), huizache (*Acacia farnesiana*), abrojo (*Koeberlinia spinosa*), nopal (*Opuntia lindheimeri*), pitaya (*Echinocereus enneacanthus*), maguey (*Agave sp.*) y anacahuita (*Cordia boissieri*). Existen también áreas destinadas a los pastizales y áreas de agricultura de temporal de frijol y maíz (INEGI, 1978).

3.3 PRESA EL CUCHILLO-SOLIDARIDAD

Los trabajos de construcción de la Presa se iniciaron a finales de noviembre de 1990 y fue inaugurada el 17 de octubre de 1994. El Vaso tiene una capacidad total de almacenamiento de 1,784.7 Mm^3 al nivel del NAME (166.66 m.s.n.m.) La capacidad útil es de 1,123 Mm^3 en el nivel de NAMO (162.35 m.s.n.m.). El área del embalse es de 180.9172 km^2 al NAME y de 127.9489 km^2 al NAMO. El bordo libre de la Presa es 3 m. La Cortina de la Presa es del tipo de materiales graduados según la clasificación de TORRES-HERRERA (1987). En la Figura 3.1 se muestra la localización de la Cortina y del Dique de la Presa El Cuchillo

3.3.1 Construcción de la Presa de almacenamiento

La Comisión Nacional del Agua (CNA, 1993) presentó un informe sobre las características técnicas de la Presa El Cuchillo – Solidaridad, tomándose únicamente aspectos más relevantes sobre la Cortina y el Dique y que a continuación se presentan.

La edificación de la obra requirió de la construcción de 4,800 m de Cortina, de los cuales 4,480 m son de materiales graduados y un tramo de 320 m de concreto. La Corona tiene una elevación de 169.66 m.s.n.m. y un ancho de 3.60 m. El tramo de concreto está formado por una sección vertedora para control y regulación de avenidas de 112 m de longitud, donde están instaladas siete compuertas radiales de 13 m de

Las especies vegetales presentes en el área son cenizo (*Leucophyllum frutescens*), chaparro prieto (*Acacia Regidula*), tasajillo (*Opuntia leptocaulis*), guayacán (*Porlieria angustifolia*), coyotillo (*Karwinskia humboltiana*), salvia (*Croton torreyllanus*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), sangre de dragón (*Jatropha dioica*), huizache (*Acacia farnesiana*), abrojo (*Koeberlinia spinosa*), nopal (*Opuntia lindheimeri*), pitaya (*Echinocereus enneacanthus*), maguey (*Agave sp.*) y anacahuita (*Cordia boissieri*). Existen también áreas destinadas a los pastizales y áreas de agricultura de temporal de frijol y maíz (INEGI, 1978).

3.3 PRESA EL CUCHILLO-SOLIDARIDAD

Los trabajos de construcción de la Presa se iniciaron a finales de noviembre de 1990 y fue inaugurada el 17 de octubre de 1994. El Vaso tiene una capacidad total de almacenamiento de 1,784.7 Mm^3 al nivel del NAME (166.66 m.s.n.m.) La capacidad útil es de 1,123 Mm^3 en el nivel de NAMO (162.35 m.s.n.m.). El área del embalse es de 180.9172 km^2 al NAME y de 127.9489 km^2 al NAMO. El bordo libre de la Presa es 3 m. La Cortina de la Presa es del tipo de materiales graduados según la clasificación de TORRES-HERRERA (1987). En la Figura 3.1 se muestra la localización de la Cortina y del Dique de la Presa El Cuchillo

3.3.1 Construcción de la Presa de almacenamiento

La Comisión Nacional del Agua (CNA, 1993) presentó un informe sobre las características técnicas de la Presa El Cuchillo – Solidaridad, tomándose únicamente aspectos más relevantes sobre la Cortina y el Dique y que a continuación se presentan.

La edificación de la obra requirió de la construcción de 4,800 m de Cortina, de los cuales 4,480 m son de materiales graduados y un tramo de 320 m de concreto. La Corona tiene una elevación de 169.66 m.s.n.m. y un ancho de 3.60 m. El tramo de concreto está formado por una sección vertedora para control y regulación de avenidas de 112 m de longitud, donde están instaladas siete compuertas radiales de 13 m de

ancho por 16 m de altura, flanqueados, éstos, por dos tramos de sección de gravedad no vertedora con paredes verticales del lado de aguas arriba y talud 0.75:1 aguas abajo. El tramo de concreto está ligado en ambos extremos con la Cortina de materiales graduados, que consiste en un corazón de material impermeable con longitudes de 1,322 m en la margen izquierda y 3,158 m, en la margen derecha (Fig. 3.2).

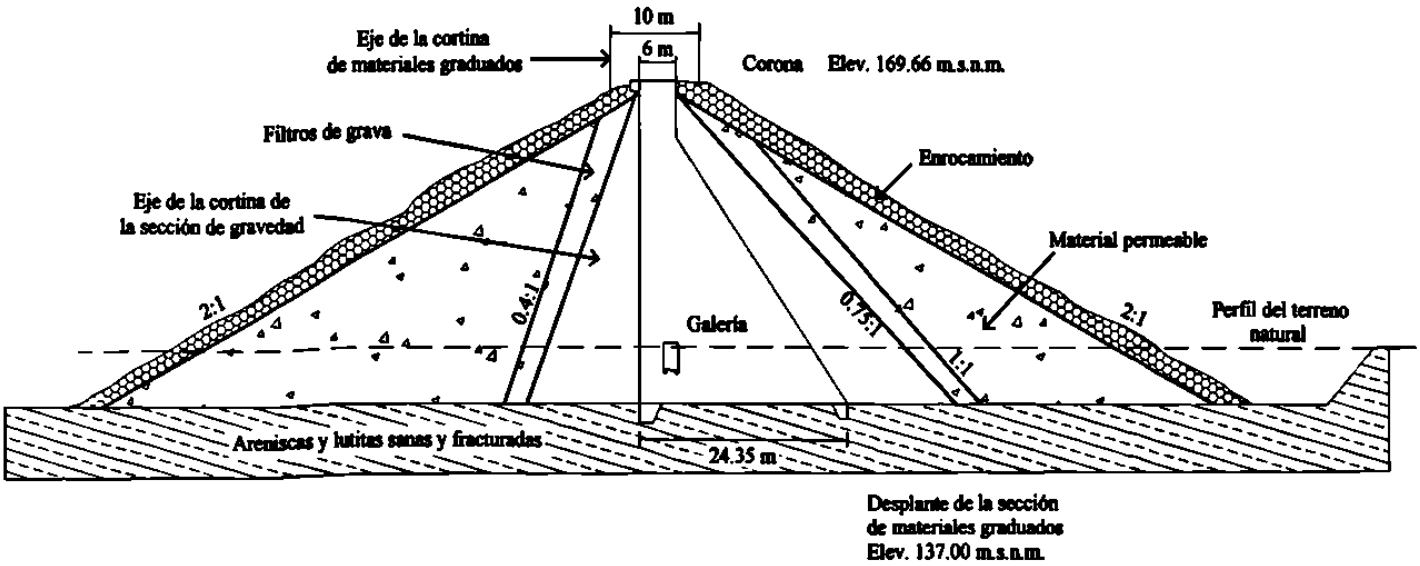

Figura 3.2 Sección transversal de la Cortina de la Presa El Cuchillo sobre la Formación Mount Selman (modificado de CNA, 1993).

El vertedor de la Cortina es de cresta recta controlada con perfil Creger. La elevación de la cresta vertedora es la cota 151.75 m.s.n.m. y tiene una longitud total de 112 m; en ella se instalaron las compuertas con sus respectivos mecanismos elevadores y accesorios para la operación.

La obra de control descarga al río por medio de un tanque amortiguador de 96 m de longitud con un ancho de pantalla que varía de 112 m a 75 m, y taludes variables de 1:1 y 0.5:1. El espesor de la losa del piso es de 2.50 m y está anclada con varillas de 3.8

cm de diámetro a 6 m de profundidad, sobresaliendo del terreno natural 0.5 m con un doblés para agarrarla al concreto. Se colocó además, en la obra de descargue, enrocamiento aguas abajo con el objeto de proteger el tanque amortiguador contra la erosión. La longitud del enrocamiento fue de 128 m, con un espesor que varía de 3.50 a 1.50 m en la pantalla y de 1.50 m en los taludes

La obra de toma principal, que es para el suministro de agua a la Zona Metropolitana de Monterrey, está localizada en la margen izquierda del tramo denominado Dique. Esta toma es del tipo torre de concreto reforzado con un puente de operación y cuatro umbrales a diferentes cotas de operación, manejadas mediante compuertas de 2 m de alto, conectadas a la planta de bombeo cero por medio de dos tuberías de acero de 2.13 m de diámetro, ahogadas en concreto. El gasto de operación es de 10 m^3/s.

La obra de toma para el acueducto regional es del tipo de tubería a presión de 35.6 cm de diámetro, que pasa a través de la sección de gravedad, y consta de una torre adosada al cuerpo de la Cortina aguas arriba y se opera por válvulas de mariposa de 35.6 cm de diámetro a tres diferentes niveles.

La obra de toma para riego es del tipo de tubería a presión de 1.83 m de diámetro, operada por una compuerta deslizante de 2 por 2 m, localizada en el paramento de aguas arriba en la sección de gravedad. La tubería revestida de concreto, en el paramento de aguas abajo es manejada desde la caseta de operación a través de una válvula de chorro divergente de 1.83 m de diámetro, que descarga en el canal de concreto revestido, que sirvió para el cierre definitivo.

El estudio geológico efectuado en el sitio de la boquilla detectó la existencia predominante de alternancias de lutitas y areniscas fracturadas. Por lo anterior se realizó tratamiento de cementación con el fin de reducir la permeabilidad y mejorar la resistencia de la cimentación, tanto del Dique como en la Cortina de materiales graduados. El

tratamiento consistió en la ejecución de una pantalla profunda y dos o más líneas de tapete de consolidación dentro de las trazas del corazón impermeable. Este tratamiento se hizo por medio de perforaciones verticales de 8.26 cm de diámetro con separación y profundidad de 10 m para el tapete de consolidación, y de 15 a 25 m para la pantalla que varió en función de la carga hidráulica (CNA, 1993).

La cementación se efectuó inyectando en forma ascendente lechadas a presión de 1 a 5 kg/cm^2 de cemento-bentonita, mezclas con diferentes proporciones que varían desde 3:1 hasta 0.7:1 para la primera etapa. Es importante señalar que en algunos sitios las lechadas fueron superiores a los 50 kg/cm^2 consumo máximo permitido, según especificaciones. Fue necesaria la realización de barrenos adicionales para cerrar en forma de cuadrícula a 5 m, cuando se trataba de barrenos de consolidación de segunda etapa y linealmente a 5 m para la pantalla profunda, llegándose, en algunos casos, hasta la cuarta etapa, siendo la separación de 1.25 m.

Una vez efectuada la limpieza para el desplante en el cauce del río, en el canal de desvío y en la zona del Dique, se descubrió una serie de fracturas verticales que cruzaban diagonalmente el eje de la Cortina. Algunas de las fracturas estaban abiertas y vacías, otras rellenas de arcillas, considerándose que el tratamiento de inyección vertical no garantizaba la impermeabilidad en estas zonas, por lo que se decidió hacer un tratamiento especial. El tratamiento fue costureo para cada grieta mediante la perforación de barrenos inclinados 30° respecto de la vertical a 2.50 m hacia la fractura en ambos lados, con separación y profundidad de 10 m en toda su longitud, aplicándose las mismas mezclas y presiones de hasta 2.0 kg/cm^2. Después del tratamiento se sabe se efectuaron ensayos de bombeo, pero los datos no están disponibles (CNA, 1993).

Con el fin de tener información sobre el comportamiento del cuerpo de la Cortina y el subsuelo, durante la construcción y primer llenado del Vaso, se instalaron en la Cortina 23 piezómetros casagrande, nueve piezómetros neumáticos, seis inclinómetros y 23 testigos superficiales (Ver Tabla 3.1).

TABLA 3.1

INSTRUMENTACIÓN COLOCADA EN LA CORTINA DE LA PRESA EL CUCHILLO.

ESTACIÓN	PIEZÓMETROS CASAGRANDE	PIEZÓMETROS NEUMÁTICOS	INCLINÓMETROS	TESTIGOS SUPERFICIALES
0 + 975	5	—	2	7
1 + 710	5	6	2	10
2 + 880	5	3	2	6
2 + 185	1	—	—	—
3 + 300	1	—	—	—
3 + 500	2	—	—	—
4 + 800	3	—	—	—
5 + 126	1	—	—	—

3.3.2 Construcción del Dique

El Dique es la continuación de la Cortina hacia el empotramiento de la margen izquierda, tiene una longitud de 6 km y altura máxima de 27 m. Está constituido también por un corazón de material impermeable de 4 m de corona y taludes de 0.4:1, filtros de material Reynosa graduados en ambos paramentos de 1.35 m de espesor, respaldos de material Reynosa con taludes de 2:1 y chapa de enrocamiento de 1.50 m de espesor, en el talud de aguas arriba, con corona de 8 m de ancho. La cementación se realizó a lo largo de todo el Dique.

CAPÍTULO 4
GEOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

El estado actual de la geología en el NE de la República Mexicana es el resultado de procesos desarrollados a lo largo del tiempo, que desde nuestra perspectiva podrían parecer estáticos, sin embargo, en ella tienen lugar los procesos hidrogeológicos que se registran en China, N.L., donde se construyó la Presa El Cuchillo.

En este capítulo se presenta la geología regional del NE de México, así como la geología local y estructural del área de estudio. El trabajo realizado en esta investigación consistió en la identificación y cartografía de las unidades geológicas, su caracterización petrográfica y la determinación de la porosidad primaria. Con el fin de tener un control estructural de las rocas se realizaron mediciones de la estratificación y de los diferentes sistemas de diaclasas, así como el análisis estadístico de su distribución y abertura.

4.2 GEOLOGÍA REGIONAL

La región de estudio se encuentra en la subprovincia geológica Cuenca de Burgos, que pertenece fisiográficamente a la Planicie Costera del Golfo (SPP, 1981) y geológicamente a la provincia NE (LÓPEZ-RAMOS,1982). Los límites geográficos de la subprovincia son: al Norte, el Río Bravo; al Este, el Golfo de México; al Sur y Sureste, el Río Soto La Marina y, el flanco oriental de la Sierra de Cruillas. El límite al Oeste lo forma la línea que parte del flanco Este de la Sierra de Cruillas al Este de Montemorelos y que desde este punto sigue hacia el Norte y pasa al Oeste de Nuevo Laredo. Esta última línea descrita corresponde al contacto Cretácico-Eoceno. El área de la subprovincia es de aproximadamente 45,000 km^2, predominando la topografía de grandes llanuras (LÓPEZ-RAMOS, 1982). A continuación se presenta una síntesis de la geología regional del área y de la estratigrafía desde el pre-terciario hasta el reciente.

- **PRE-TERCIARIO**

El basamento Paleozoico, en el que descansa la secuencia sedimentaria Mesozoica, se interpreta como una continuación del Cinturón Oachita del SE de los Estados Unidos. Los períodos de emersión y fallamiento, ocurridos durante el Triásico y Jurásico, enmarcan la paleogeografía de la parte superior del Mesozoico y dan lugar al depósito de capas rojas continentales de la Formación Huizachal (SPP, 1981).

MEIBURG (1987) presenta el desarrollo del Mesozoico y Cenozoico del NE de México en seis etapas:

a) Rifting en el Triásico Superior hasta el Jurásico Inferior. Sedimentación terrestre de lechos rojos (Formación Huizachal) y posteriormente un vulcanismo andesítico.

b) Transgresión marina a partir del Calloviano Superior con precipitación de sulfatos y sal (Formación Minas Viejas), póstumo de la primera etapa, con grandes espesores de sedimentos. Posteriormente formación de plataforma marina durante el Oxfordiano Tardío/Kimmeridgiano, hasta finales del Tithoniano (Formaciones Zuloaga y La Casita).

c) Subsidencia del NE de México a partir del Berriasiano (Formación Taraises). La paleobatimetría cambia progresivamente del E a W entre Berremiano y Cenomaniano. Distribución de facies de plataforma (Formaciones Cupido, La peña, Aurora) y facies de aguas profundas (Formaciones Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior y Cuesta de Cura).

d) Basculamiento hacia el Este, a partir del Turonianio hasta el Paleoceno, provocando el aumento del ángulo de inclinación de la cubierta jurásica/cretácica post-salinar. Traslado de las líneas litorales de Oeste a Este.

e) Inicio de la divergencia acelerada entre el levantamiento de la Sierra Madre Oriental y el hundimiento de la Llanura Costera del Golfo. Desprendimiento de la cubierta sedimentaria arriba del salinar de la Formación Minas Viejas durante el Paleoceno Superior y Eoceno (tectogénesis Laramídica). Deslizamiento y plegamiento del piso post-salinar. Transporte tectónico en dirección NE. Compresión máxima con cabalgamiento al margen oriental de la cuenca salinar. Inyección de la sal frente a la Curvatura de Monterrey con diapirismo halotectónico.

f) Continuación de la divergencia acelerada entre levantamiento al Oeste y hundimiento al Este a partir del Eoceno. La dilatación y subsidencia provocan alta descarga sedimentaria durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno con espesores hasta de 350 m/Ma, en la Cuenca de Burgos. Traslado progresivo de las líneas costeras hacia el Golfo de México.

- **TERCIARIO**

La geología regional ha sido tomada de trabajos de RODRÍGUEZ-LOZANO (1976), LÓPEZ-RAMOS (1982), SCHLUMBERGER (1984) y ECHÁNOVE-ECHÁNOVE (1986) y a continuación se presentan los rasgos más importantes en lo que al terciario de la región se refiere.

La cuenca esta formada por sedimentos del Paleoceno al Reciente y las formaciones se encuentran expuestas en franjas, orientadas con un rumbo general NNW – SSE. Estratigráficamente las capas antiguas yacen en la porción occidental, siendo más jóvenes hacia el Este y notándose un marcado engrosamiento de los sedimentos en esa misma dirección (Figura 4.1).

Litológicamente los depósitos están representados por una alternancia de lutitas y areniscas, las cuales varían en su composición de acuerdo al medio ambiente de depósitos. El mar de aquella época se retiraba paulatinamente hacia el Este, teniendo una serie de transgresiones y regresiones que dieron origen a diversos depósitos clásticos. Estos son principalmente areno-arcillosos de origen deltáico o de barras (Oligoceno) y por supuesto marino somero (Epinerítico).

Las areniscas son generalmente de grano fino a medio, de color café a gris y su grado de compactación varía de acuerdo al cementante, siendo más o menos bien consolidadas en el Oligoceno y Mioceno. Las lutitas son de colores variables, ocasionalmente yesíferas, con pequeñas intercalaciones de cenizas volcánicas y contienen algunos restos de plantas, su grado de dureza varía de semiduras a suaves.

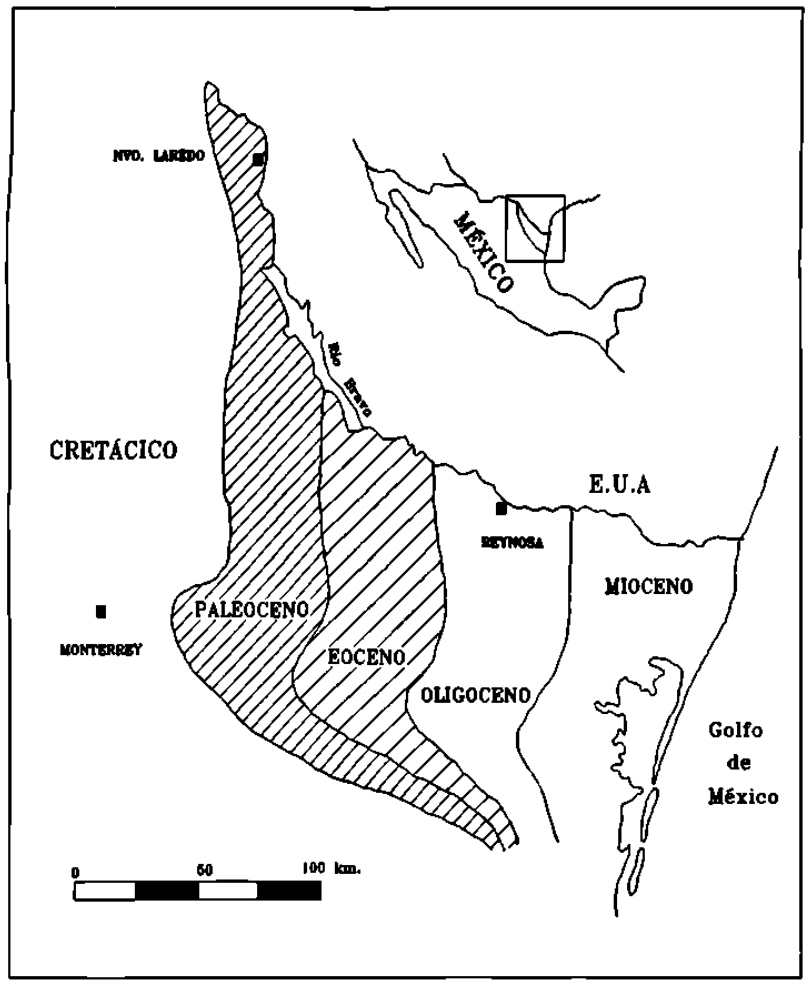

Figura 4.1 Provincia de Burgos en donde se muestra la distribución de las rocas del Terciario (Modificado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).

Los movimientos tectónicos actuaron moderadamente durante el depósito de los sedimentos terciarios, registrándose un máximo levantamiento a fines del Oligoceno, originando que los sedimentos del Mioceno traslapen a los depósitos del Vicksburg.

Todas las formaciones del Terciario tienen un echado regional predominantemente hacia el Este, con deformaciones suaves, formando terrazas estructurales y pequeños anticlinales orientados NNW a SSE sensiblemente paralelos a los ejes de los plegamientos de la Sierra Madre Oriental. Lo anterior indicando que los

esfuerzos deformantes provienen del W y SW y otros, como consecuencia de esfuerzos deformantes hacia el Sur. En la Figura 4.2 se presenta la columna estratigráfica de las rocas del Terciario.

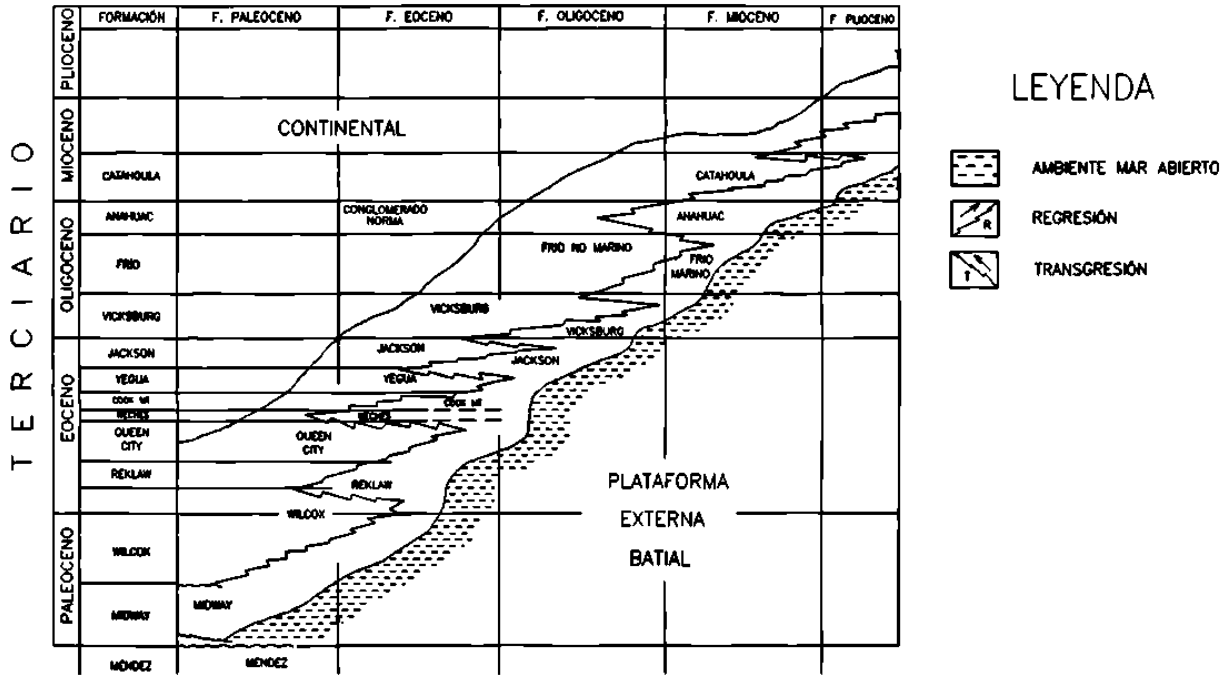

Figura 4.2 Secuencia estratigráfica del Terciario en la Provincia de Burgos (Tomado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).

ESTRATIGRAFÍA DEL CENOZOICO

Las características litológicas de las rocas sedimentarias del Cenozoico del NE de México son descritas a continuación en orden decreciente de edad y han sido tomadas de RODRÍGUEZ - LOZANO (1976), LÓPEZ-RAMOS (1982), SCHLUMBERGER (1984) y ECHÁNOVE-ECHÁNOVE (1986).

PALEOCENO

Formación Velasco: representa una facie de aguas profundas equivalente a la

parte inferior de la Formación Midway. Forma una franja de aproximadamente 390 kilómetros de largo y de anchura variable. La formación está constituida por una serie de margas y lutitas de colores gris y gris azul, con algunos delgados lechos de areniscas calcáreas. La formación se acuña hacia el extremo norte de la franja de su afloramiento. Su espesor es de 250 a 800 m.

Formación Midway: su orientación es N – S y la parte inferior de la formación está representada por sedimentos de litoral, tales como areniscas y arenas con abundante glauconita y lentes calcáreas con fósiles retrabajados especialmente foraminíferos del Cretácico. Los estratos superiores de la Formación Midway están formados por sedimentos marinos de aguas profundas y están representados por lutitas con abundante fauna marina y con escasas concreciones calcáreas. El espesor de esta formación es de 400 a 1000 m.

Las rocas del Paleoceno Medio y Superior son consideradas de gran importancia por su producción de hidrocarburos, seguidos en menor producción por los del Paleoceno Inferior.

EOCENO

Formación Wilcox:. los sedimentos de esta formación descansan discordantes sobre la formación Midway. Están constituidos por capas delgadas de lutitas y de areniscas arcillosas dispuestas en alternancia. Ocasionalmente se encuentran intercalados bancos gruesos de areniscas con micas, con estratificación cruzada y capas gruesas de arcilla de colores gris y rojo. En la parte media de la formación se distinguen algunas capas de yeso y material lignítico. Su espesor es de 800 a 1300 metros. Superficialmente, la formación Wilcox, está distribuida en una franja paralela a la formación Midway.

Grupo Claiborne

Formación Carrizo: la porción basal está constituida por una arenisca conglomerática con lumachella sp. En general, dicha formación se compone en su mayoría de arenas y areniscas de grano fino a medio, de colores blanco a rojizo, según el grado de intemperismo. Entre estos sedimentos se encuentran intercalaciones arcillosas de 2 a 15 m de espesor. La característica litológica más notable es la presencia de la arenisca "Once Lomas", esta es una arena de duna de grano fino a grueso, frecuentemente tiene estratificación cruzada y colores gris, naranja y rojo a blanco-azuloso. Su espesor es de 300 a 800 m.

Formación Mount Selman: espesor de 250 a 1200 m y se divide en los miembros Recklaw, Queen City y Weches que a continuación se describen:

a) Recklaw es el miembro inferior de esta formación, está constituido por arenas interestratificadas con lutitas y arcilla de colores verde, rosa y púrpura, en ocasiones ferruginosas, con yeso y trazas de azufre y lutitas carbonosas que sugieren un origen subcontinental. Descansan aparentemente en secuencia normal sobre la formación Carrizo.

b) Queen City se compone de arenas de cuarzo de grano fino a medio de color gris, interestratificados con lechos de lutitas y arcillas con foraminíferos de aguas salobres.

c) Weches es el miembro superior de esta formación; representado por depósitos esencialmente marinos. Lo forman arenas de color gris, lutitas café, gris y rojizo, con abundancia de foraminíferos y macrofósiles. En su parte superior se presentan concreciones ferruginosas obscuras.

En la superficie, la formación Mount Selman, se refleja en una topografía de valles amplios y lomas prominentes.

Formación Cook Mountain: aflora en una franja orientada burdamente de NNW a SSE. En la localidad típica, la formación está constituida por una serie de areniscas glauconíticas de color gris verdoso, que alternan con capas delgadas de arcillas de color

gris y café que por intemperismo toman un color amarillo intenso. Sus contactos superior e inferior son concordantes. Tiene un espesor de 250 a 1000 m.

Formación Yegua: representa la parte superior del grupo Claiborne y al igual que las formaciones anteriores, su afloramiento se orienta prácticamente de Norte a Sur. Esta formación se constituye por una potente serie de arcillas de color gris y verde, con intercalaciones de lutitas carbonosas, dispuestas entre dos cuerpos de areniscas de color gris, que se conocen con los nombres de Areniscas Mier, en la parte inferior, y Areniscas Alamo, en la parte superior. Entre las arcillas se encuentran lechos de ostreas. Esta formación tiene un espesor de 100 a 1000 m y es de importancia económica dentro de la Cuenca de Burgos por su producción de hidrocarburos.

Formación Jackson: es del Eoceno Superior y su espesor varía de 300 a 2000 m. Constituida por arenas y areniscas interestratificadas con lutitas arenosas de color verde y gris, además tiene abundantes fósiles. Contiene capas de cenizas volcánicas y madera silicificada en la parte media y superior. En términos generales, la formación varía de una facie predominantemente arenosa y tobácea en el Norte, a un complejo lutítico hacia el Sur. Junto con el cambio de facie se advierte un aumento en el espesor hacia la parte Sur. La Formación contiene una abundante fauna de foramníferos, que permite subdividirla en tres miembros conocidos con los nombres de Whitsett, McElroy y Caddell. Al igual que otras formaciones, ésta es de importancia económica en la Cuenca de Burgos por contener hidrocarburos explotables.

OLIGOCENO

Formación Vicksburg: representa la base del Oligoceno. Es de interés económico por los desarrollos arenosos que presenta en su sección, que son productores de aceite y gas en varios campos de México y de Texas, en los Estados Unidos y tiene espesores de hasta 3000 m. Está constituida por sedimentos marinos y salobres, arcillas y arenas de grano fino a medio que alternan con lechos de ceniza volcánica, con abundancia de microfósiles. Su separación de la suprayaciente formación Frío, por

medios paleontológicos, resulta un tanto difícil a causa de la escasez de fósiles índice.

Entre las dos formaciones mencionadas se encuentra una potente sección arenosa que las separa y que se ha denominado Sam Fordyce. Por medios micropaleontológicos pueden distinguirse dos zonas dentro de la formación Vicksburg, una de aguas salobres y otra de aguas marinas, cada una de ellas con faunas propias de su ambiente. La zona de aguas salobres, que es la superior, se encuentra inmediatamente debajo de la arena Sam Fordyce. Dentro de la zona marina, que es la inferior, se encuentran los cuerpos arenosos Mission y Heard, productores de aceite y gas.

Formación Frío: la formación yace concordantemente sobre la Formación Vicksburg y en discordancia bajo el Conglomerado Norma y la formación Catahoula. Esta formada esencialmente por lutitas de colores gris y rojizo, bentoníticas, con escasos lentes arenosos. En su afloramiento superficial carece de fauna y se le considera representativo del miembro no marino del subsuelo y tiene un espesor de 200 a 4000 m. En la Cuenca de Burgos se han podido distinguir dos miembros de la Formación Frío, que se conocen con los nombres de Frío No Marino, el Superior y Frío Marino, el Inferior.
a) Miembro Frío Marino: se compone principalmente de lutitas de color gris, verde y café, con abundancia de foramíniferos y tiene un espesor de 30 a 1000 m.
b) Miembro Frío No Marino: está formado por lutitas de color café rojizo, gris y verde, fragmentos de anhidrita y de yeso; varios cuerpos arenosos de carácter lenticular, de grano fino a grueso, de permeabilidad variable, muy calcárea en partes, que constituyen los horizontes productores de hidrocarburos en el campo. Este conjunto de sedimentos prácticamente carece de fauna. Este miembro tiene un espesor hasta de 2000 m.

Conglomerado Norma: se trata de un desarrollo sedimentario local que cubre a la Formación Frío y está cubierto a su vez por la Formación Catahoula. Lo forma un gran abanico de clastos gruesos, desde gravilla hasta guijarros grandes de 30 a 40 cm de diámetro, depositados por alguna corriente fluvial. Los cantos rodados que lo forman se

derivan de caliza, roca ígnea y arenisca. Se encuentran además, restos de madera silicificada, fragmentos de pedernal y algunos lechos arenosos de carácter lenticular. Se trata, en consecuencia, de un depósito continental de distribución local. Su afloramiento en la superficie cubre una superficie de 240 km^2. El espesor de la formación es de 75 a 300 m.

Formación Anáhuac: esta formación no ha sido identificada en la superficie, sólo en pozos de la parte oriental de la Cuenca de Burgos. Está representada por sedimentos marinos, lutitas de colores café y café rojizo y arenas de grano fino, de colores café a gris, pobremente consolidados. Esta formación adopta una forma de cuña, que se ensancha hacia el Este. El espesor de la formación es de 80 a 120 m.

Formación Catahoula: se compone de lutitas y arenas con abundancia de material tobáceo. Las lutitas son de color gris verdoso, plásticas; las arenas presentan color gris claro, gris verdoso y verde, de textura fina. Los sedimentos de esta formación están, en general, bien estratificados y parecen haber sido depositados a lo largo de una zona costera de aguas poco profundas. En términos generales, la formación no tiene fauna.

MIOCENO

Formaciones Oakville y Lagarto: están formadas por sedimentos continentales y de aguas someras. Constituidas por arenas, areniscas, gravas y arcillas, materiales dispuestos en capas que frecuentemente presentan estratificación cruzada. En conjunto tienen un espesor de 20 a 3000 m.

PLIOCENO

Formación Goliad (Equivalente a la Formación Reynosa): la forman sedimentos de origen continental, gravas, arenas y arcillas con trazas de material yesífero, que probablemente fueron depositados por ríos y arroyos caudalosos sobre la superficie del Mioceno en forma de grandes abanicos deltáicos. Su espesor varía de 15 a 35 metros.

Existen grandes extensiones formadas de caliche, que llevan también el nombre de Caliche Reynosa.

- **CUATERNARIO**

Formaciones Lissie y Beaumont: ambas son de origen continental y fueron depositadas a lo largo de ríos y arroyos, así como en la costa y en deltas. Litológicamente se componen de gravas, arenas de estratificación cruzada y arcillas, sedimentos entre los que, con frecuencia, se encuentran restos de madera petrificada. El espesor de los sedimentos pleistocénicos de la Cuenca de Burgos es de 300 m en la región cercana a la costa.

4.3 GEOLOGÍA LOCAL

La Presa El Cuchillo se construyó sobre el miembro Queen City de la formación Mount Selman (Grupo Claiborne) del Eoceno. Está formado por una serie de capas de areniscas rojizas y blancas laminadas de estratos medianos y lutitas arenosas (KENNEDY, 1992), como se observan en la Figura 4.3

Las capas tienen una orientación NNW–SSE y buzamiento de 6-10° en dirección ENE en forma homoclinal (ver mapa en el ANEXO B). Las areniscas tienen un espesor fluctuante entre 15-20 cm y hasta 3-4 m, su color en muestras frescas es gris, mientras que en roca intemperizada es rojiza; en algunos lugares presentan estructuras sedimentarias, como huellas de oleaje, marcas de arrastre y estratificación cruzada, contienen, además, nódulos de óxido de fierro.

Entre las capas de areniscas existen intercalaciones de lutitas, que absorben fácilmente agua. Las areniscas corresponden aproximadamente al 30 por ciento de la columna estratigráfica, el resto lo constituyen las lutitas arenosas. Las areniscas y lutitas están afectadas por procesos de intemperismo los cuales, según datos de las perforaciones efectuadas en la base de la Cortina y del Dique, alcanzan una profundidad de 15 m. Con el intemperismo, las areniscas y las lutitas, incrementan su fracturación y

por ende su permeabilidad, la cual según los datos de los ensayos en el sitio de construcción de la Cortina es de 5 x 10^{-4} cm/s (CNA, 1993).

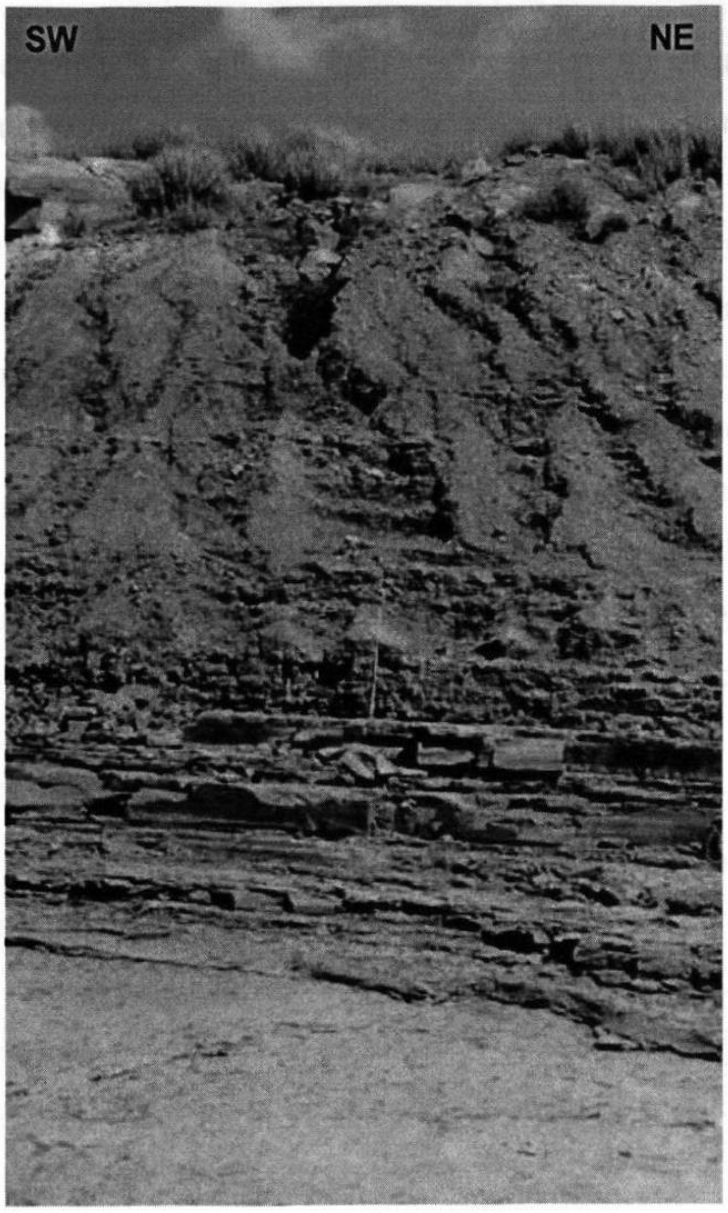

Figura 4.3 Secuencia de areniscas y lutitas arenosas de la Formación Mount Selman, en un corte en la obra de toma para riego, aproximadamente 200 m al norte de la Cortina.

Sobre las rocas del Eoceno se encuentran discordantes los conglomerados de edad pliocénica de la Formación Reynosa, ocupando las partes altas de los cerros testigos del antiguo relieve. Estos conglomerados están constituidos por cantos y gravas de rocas del Mesozoico y por fragmentos de areniscas del Eoceno.

A lo largo del Río San Juan y sus afluentes se han desarrollado depósitos aluviales en terrazas y están compuestos por limos y arenas con potentes intercalaciones y lentes de gravas, estos sedimentos se encuentran en contacto discordante con la secuencia de areniscas y lutitas del Eoceno. Las gravas son subredondeadas y mal clasificadas, en su mayoría de composición calcárea y rara vez están cementadas para dar lugar a la formación de conglomerados. Los limos son de color amarillo claro y forman paquetes de 20 a 30 cm de espesor. Una característica de los sedimentos aluviales y deluvio-proluviales es que son fáciles de saturarse de agua y se les estiman altas transmisividades, como característica hidrogeológica. El relieve superficial es muy suave, presenta ondulaciones en donde las lutitas constituyen los valles y las areniscas las partes altas. Los valles se extienden en la misma dirección que las capas.

Con el fin de determinar las características petrográficas de las areniscas, se tomaron muestras en tres diferentes afloramientos, de donde se podían obtener muestras de roca no intemperizadas. El primero de ellos, denominado La Ceja (ALC), localizado en el extremo W del Dique; el segundo, ubicado en la intersección de la Cortina con el Dique (parte central del área de estudio) se le denominó El Vado (AEV); el tercero llamado El Banco (AEB), se localiza en la parte central de la Cortina. Todos los afloramientos se encuentran aguas abajo del Vaso de la Presa. Para determinar las características petrográficas microscópicas se realizaron secciones delgadas de las muestras de areniscas de los tres afloramientos. A continuación se presentan sus características:

<u>Afloramiento La Ceja</u> formado por areniscas de grano fino (0.125 – 0.250 mm de diámetro) con textura laminar; la matriz es de micrita y constituye el 10 por ciento, el restante lo constituyen granos de cuarzo y feldespato principalmente y como accesorios

limolita, opacos y fragmentos líticos. Los granos son angulosos y subangulosos y el contacto entre ellos puntual y a lo largo. Se observan pocos huecos por lo que se supone una porosidad baja.

Afloramiento El Vado formado por arenisca de grano fino (0.125 - 0.250 mm de diámetro) con textura granular; matriz micrita y constituye el 20 por ciento, el resto son feldespatos y cuarzo, además contiene fragmentos líticos y limolita. Los granos son angulosos y subangulosos del mismo tamaño y los contactos, entre ellos, son puntuales y a lo largo. Se observa moderada cantidad de huecos por lo que su porosidad se estima media. El proceso de disolución de carbonatos es evidente haciendo que aumente la porosidad.

Afloramiento El Banco. En este lugar se distinguen dos miembros, uno superior de color café con características muy similares al afloramiento La Ceja y otro inferior de color azul, semejante al afloramiento El Vado.

Con el fin de determinar la composición porcentual de los elementos mineralógicos de muestras de dos afloramientos, se tomaron fotografías a las secciones delgadas y estas se analizaron. Los lugares seleccionados fueron los afloramientos El Banco (miembro azul) y El Vado por encontrarse en ellos rocas no intemperizadas. En la Figura 4.4 (a-d) se presentan los resultados de análisis petrográfico del sitio El Banco y en la Figura 4.5 (a-d), para el sitio La Ceja. En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de los conteos, con el fin de determinar el porcentaje de cada elemento mineralógico.

TABLA 4.1

ANÁLISIS MINERALÓGICO (EXPRESADO EN PORCENTAJES).

Mineral	El Banco (miembro azul)	La Ceja
Cuarzo	9.52	22.14
Feldespatos	11.11	36.43
Calcita y arcilla	65.08	35.71
Huecos	14.29	5.72

De los resultados anteriores se puede deducir que los porcentajes correspondientes a calcita y arcillas son muy altos, especialmente para el sitio El Banco, y bastante considerable para el sitio La Ceja. Lo anterior puede permitir procesos de disolución de carbonatos y remoción de arcillas en las rocas, pudiendo aumentarse la porosidad y con esto también las filtraciones.

Los minerales originales de la roca eran cuarzo y feldespatos unidos mediante cementante calcáreo; debido a los procesos de intemperismo, los feldespatos principalmente, fueron transformándose en arcillas. El tipo de arcillas originadas se debe, entre otros factores, a la composición original de las mismas, pudiendo aparecer kaolinita y montmorillonita, entre otros (FREEZE y CHERRY, 1979; HEM, 1986; MAZOR, 1991; VELDE, 1992; MCBRIDE, 1994).

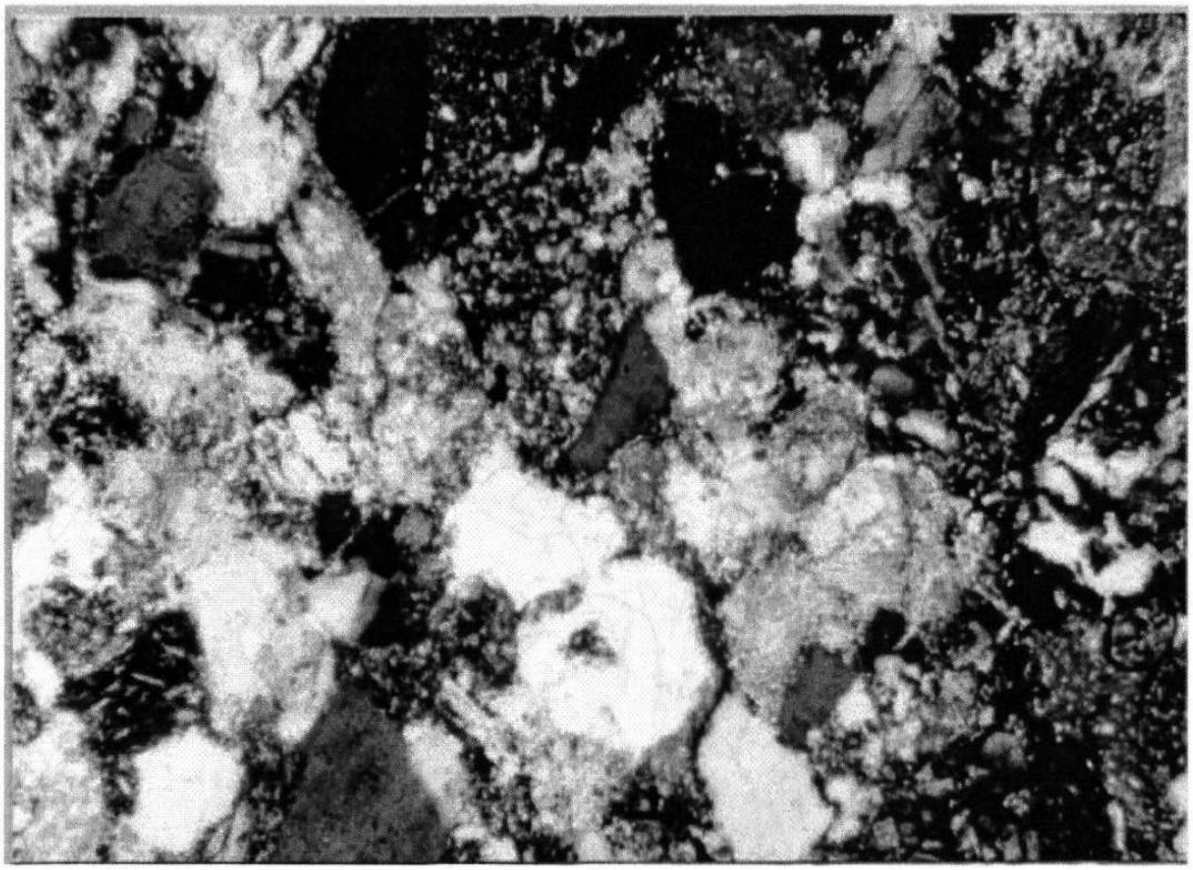

Figura 4.4 a) Fotografía de la sección delgada de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul). Largo de la fotografía = 0.925 mm.

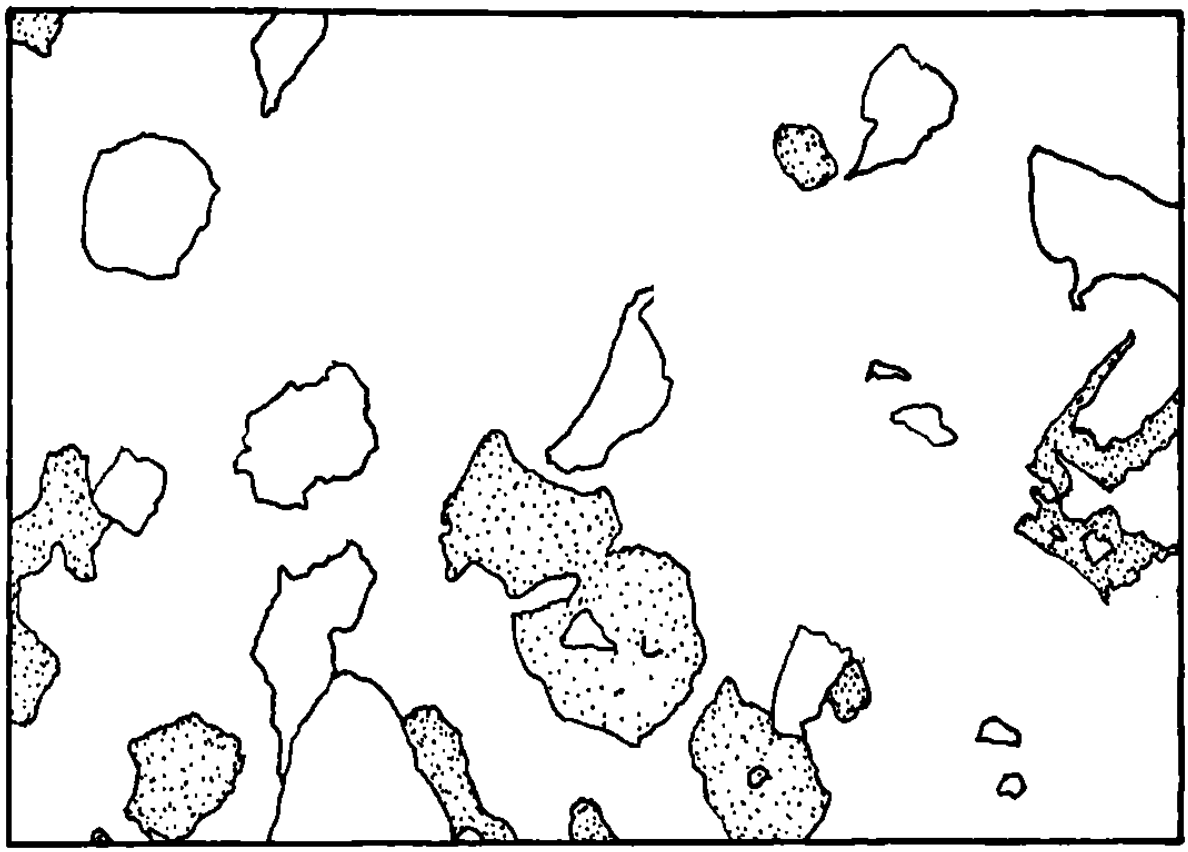

Figura 4.4 b) Minerales de cuarzo (punteados) y de feldespatos (en blanco) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).

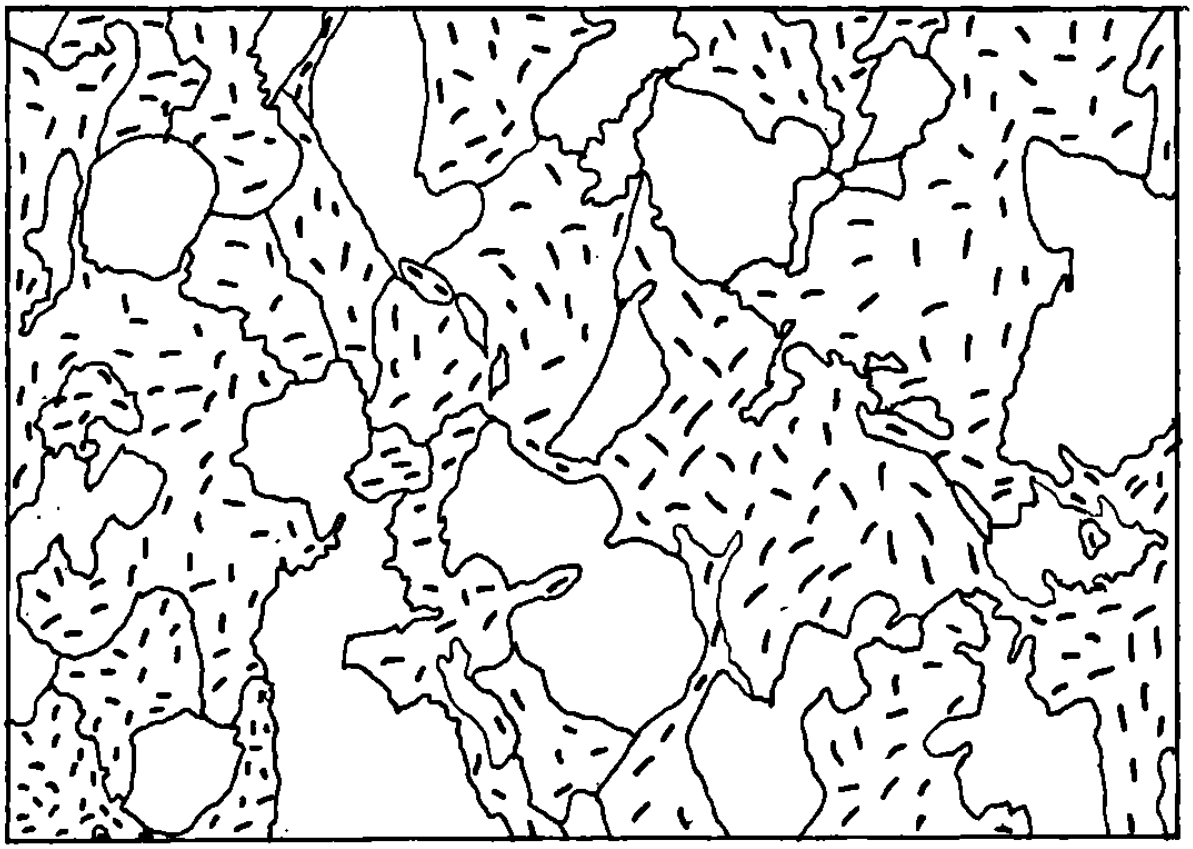

Figura 4.4 c) Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).

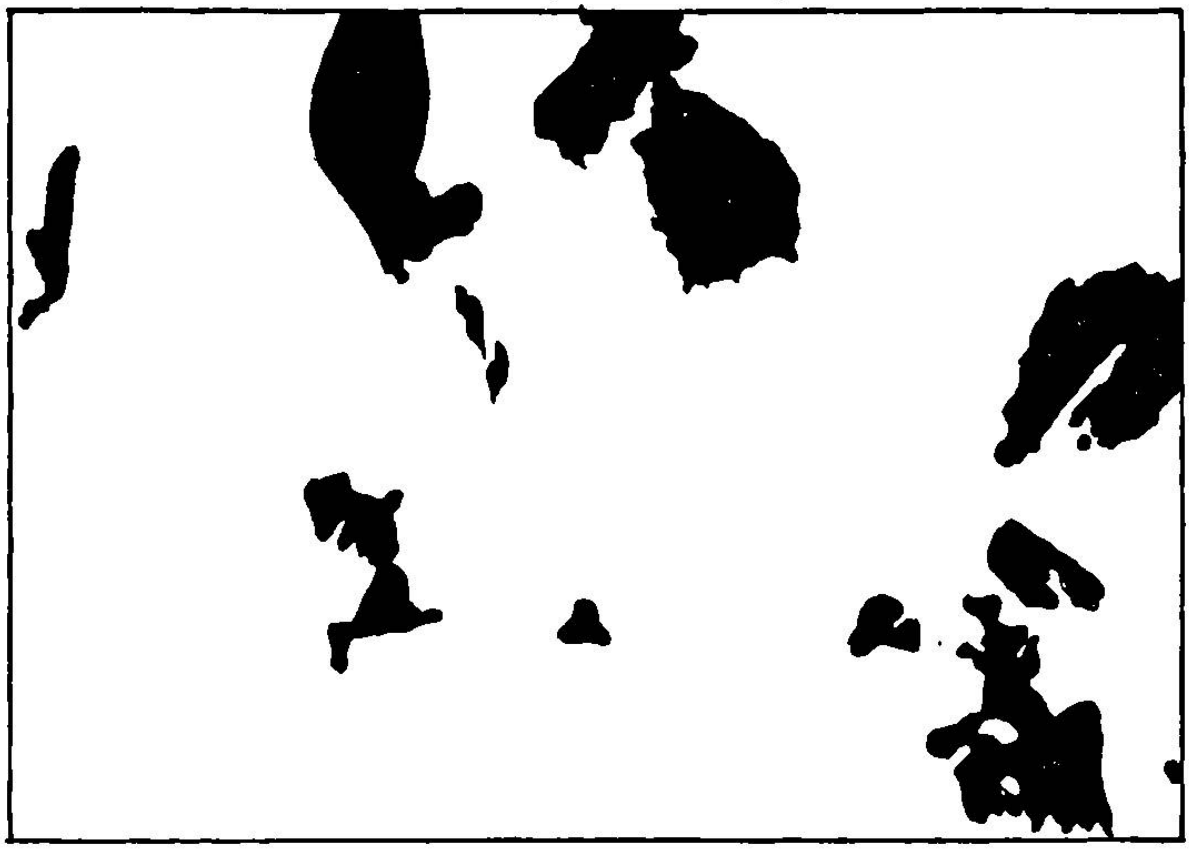

Figura 4.4 d) Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).

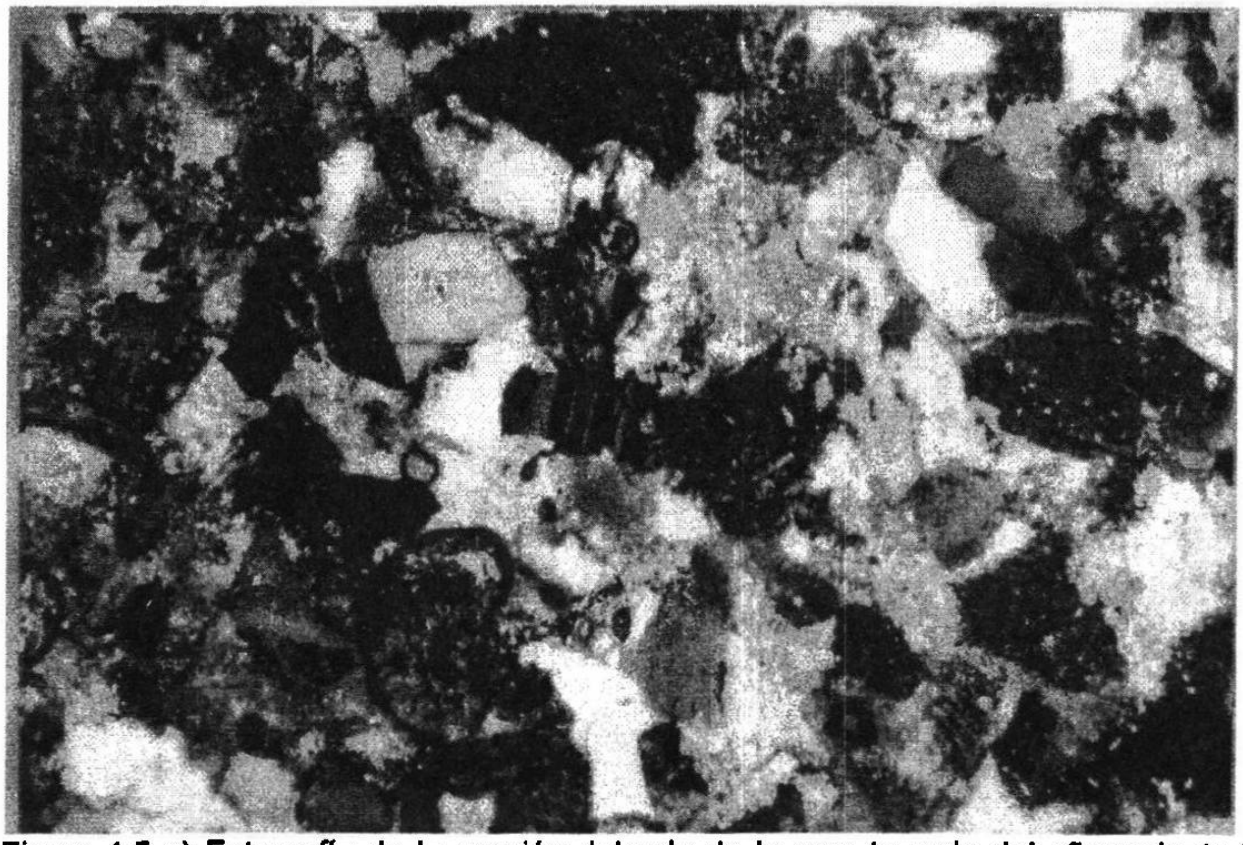

Figura 4.5 a) Fotografía de la sección delgada de la roca tomada del afloramiento La Ceja. Largo de la fotografía = 0.925 mm.

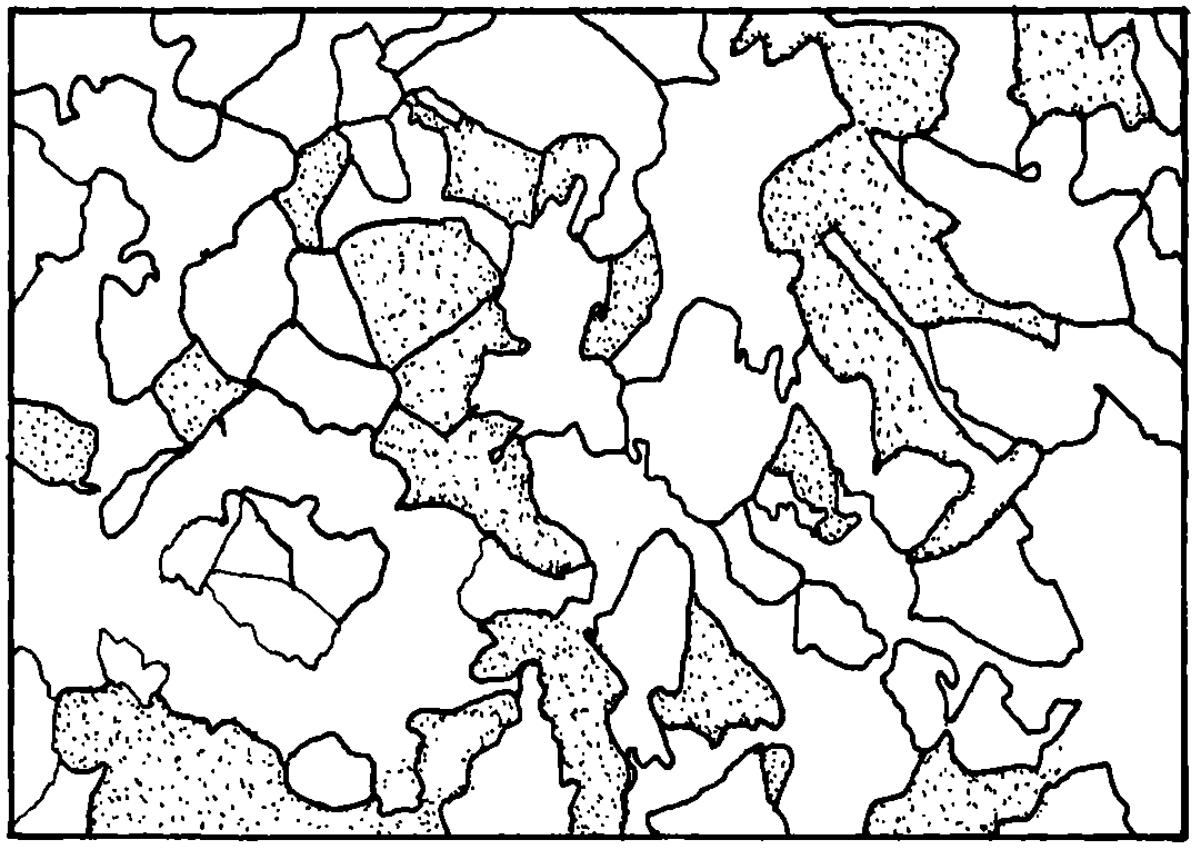

Figura 4.5 b) Minerales de cuarzo (punteados) y de feldespatos (en blanco) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.

Figura 4.5 c) Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.

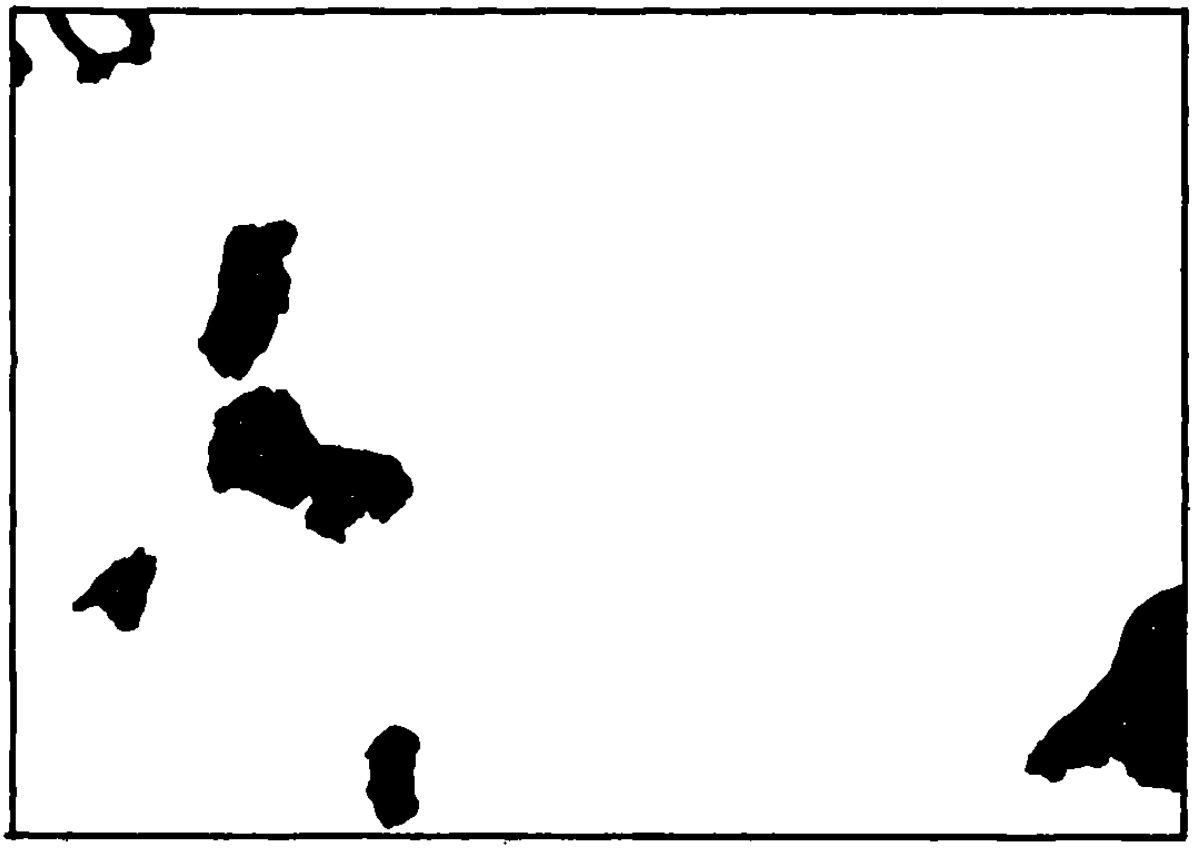

Figura 4.5 d) Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.

4.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Para determinar las condiciones estructurales del área de estudio se procedió a la interpretación de fotografías aéreas, escala 1:38,000, poniéndose énfasis en la delimitación de zonas de fracturamiento. Se tomaron en cuenta los lineamientos en el plano, la variación de la vegetación y los cambios en la morfología. Con la información obtenida se procedió a la elaboración de un mapa geológico–estructural (ver mapa en el ANEXO B), en donde se observa que los lineamientos varían en tamaño de unos cientos de metros hasta 3 – 4 kilómetros. Cabe destacar que algunos de ellos cruzan en forma oblicua al Dique, así como a la Cortina.

Para construir una rosa de orientaciones se midió la longitud y rumbo de cada lineamiento en el mapa geológico estructural; se elaboró una tabla con la información (Tabla 4.2) en la cual se pondera cada lineamiento con base a su longitud. Los valores para cada rango de las direcciones se calcularon en forma porcentual.

TABLA 4.2

DATOS DE RUMBOS DE LINEAMIENTOS Y SUS RESPECTIVOS PORCENTAJES.

RUMBO NW (EN GRADOS)	PORCENTAJE	RUMBO NE (EN GRADOS)	PORCENTAJE
1 – 10	0	1 – 10	0
11 – 20	0	11 – 21	0
21 – 30	0	21 – 30	1.22
31 – 40	0	31 – 40	0
41 – 50	24.19	41 – 50	3.26
51 – 60	09.61	51 – 60	0
61 – 70	27.85	61 – 70	4.07
71 – 80	06.51	71 – 80	6.35
81 – 90	10.42	81 – 90	6.52

En la Figura 4.6 se muestra la rosa de orientación, observándose que el rumbo principal de los lineamientos es de 40 a 70° al NW, además, existe un sistema de importancia secundaria en la dirección E–W. BARTON *et al.* (1978) mencionan que un número de 80 a 300 mediciones era necesario para definir con certidumbre los patrones de orientación preferenciales de diaclasas, siendo 150 datos un valor razonable. No obstante, en el presente estudio se tomaron 300 datos por afloramiento.

Ante la escasa existencia de afloramientos, que ofrezcan datos suficientes para el análisis estadístico de rumbo y buzamiento de diaclasas, sólo se estudiaron tres, que fue donde se realizó la tomaron las muestras para el análisis petrográfico. Los datos se representaron de dos maneras: una, mediante rosas de rumbos, siguiendo la metodología propuesta por FRANKLIN Y DUSSEAULT (1989), otra, mediante diagramas de polos, según la propuesta por RAGAN (1980). Se presentan los diagramas de rosas y de polos para el afloramiento La Ceja (Figura 4.7). Se observa del diagrama de polos que los rumbos preferenciales son N5W y N55W con echados de 80° al SW.

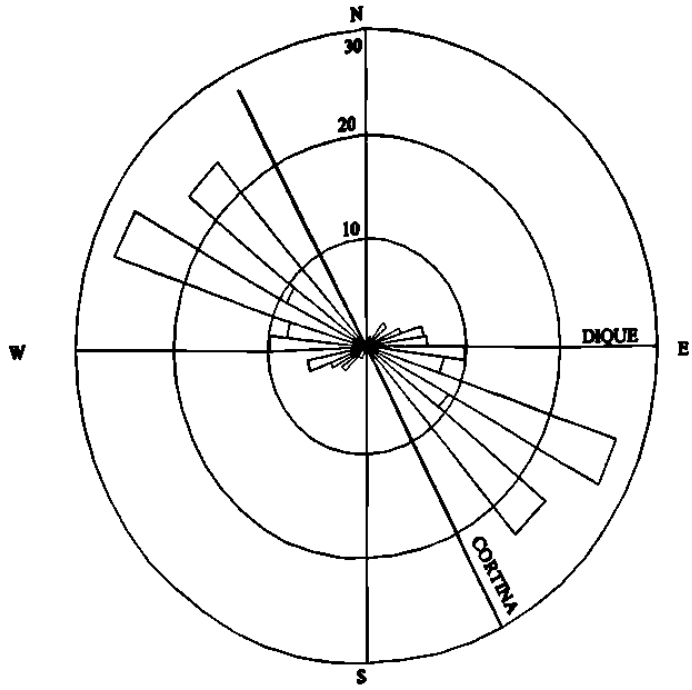

Figura 4.6 Rosa de orientaciones para lineamientos mayores del área de estudio tomados del mapa geológico - estructural.

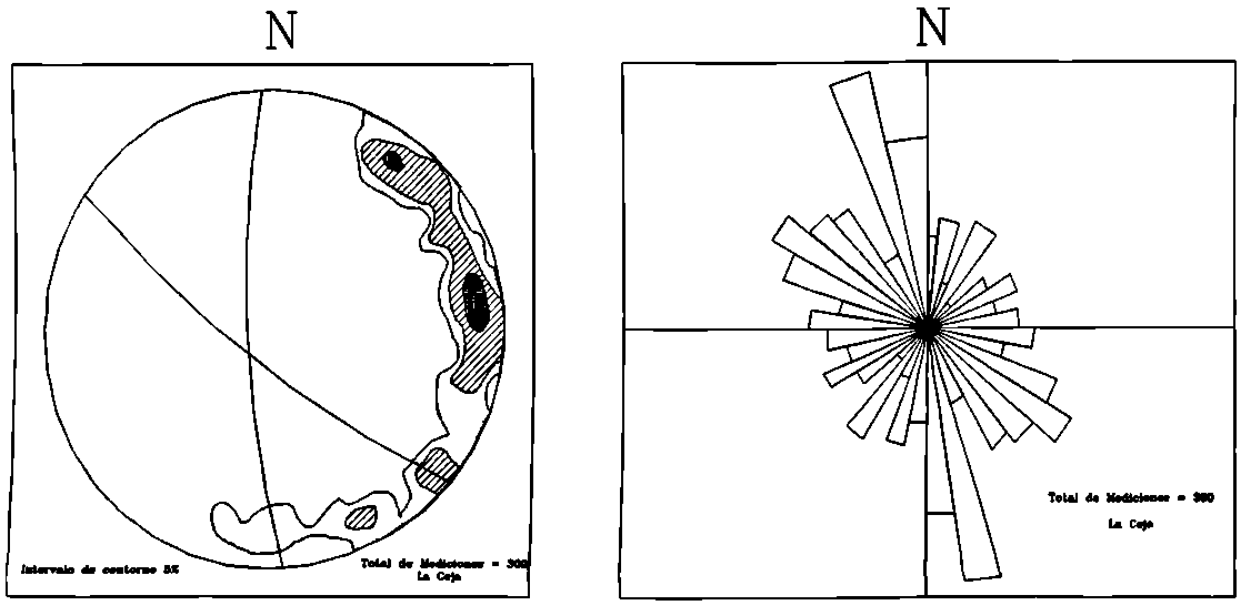

Figura 4.7 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento La Ceja.

Para los diagramas que corresponden al afloramiento El Vado (según la Figura 4.8) se distinguen tres rumbos: uno N18E, con echado de 87° al SE; otro, con rumbo N22E y echado de 82° al NW y el último con rumbo de N65W y echado de 82° al NE. Se percibe que los dos primeros sistemas son casi paralelos en rumbo, cambiando únicamente su echado; mientras que el tercer sistema es perpendicular a los dos primeros, formando un sistema ortogonal.

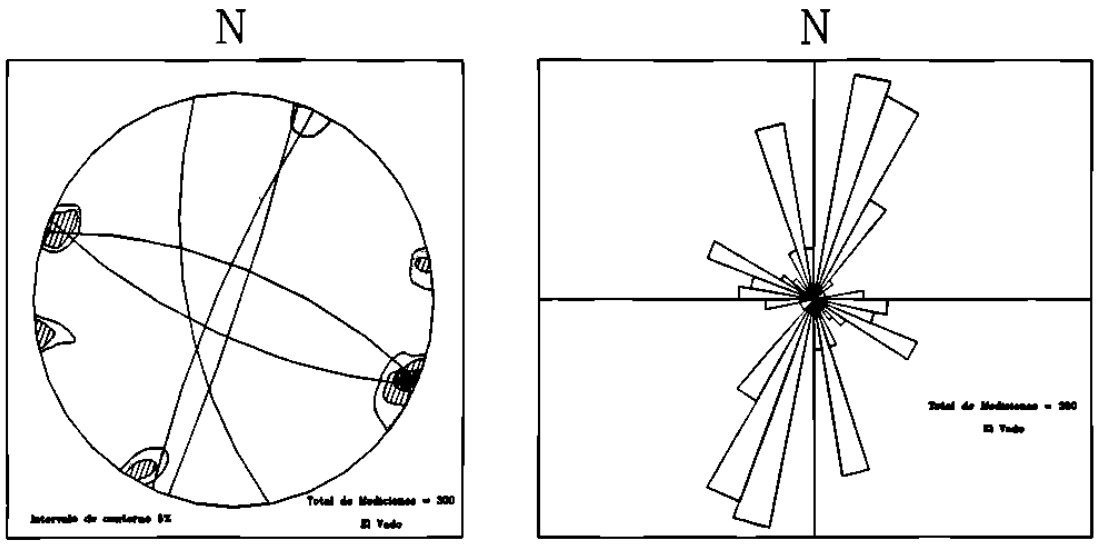

Figura 4.8 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Vado.

Por último, para el afloramiento El Banco (Figura 4.9) se presentan tres sistemas: uno con rumbo N5W y echado de 80° al SW; el segundo, N86E y echado de 80° al SE y el último con rumbo N45W y echado de 80° al SW. Los dos primeros sistemas son perpendiculares entre ellos.

Con el fin de determinar las condiciones cuantitativas de una masa rocosa se

realizan los estudios de orientación y echados de discontinuidades, sin embargo, BARTON *et al.* (1978) sugieren tomar en cuenta otros parámetros. De esta propuesta se ha determinado el espaciamiento entre fracturas, apertura, material que las rellena, número de juegos de éstas, número de fracturas por unidad de longitud, la regularidad de su espaciamiento y tamaño de los bloques.

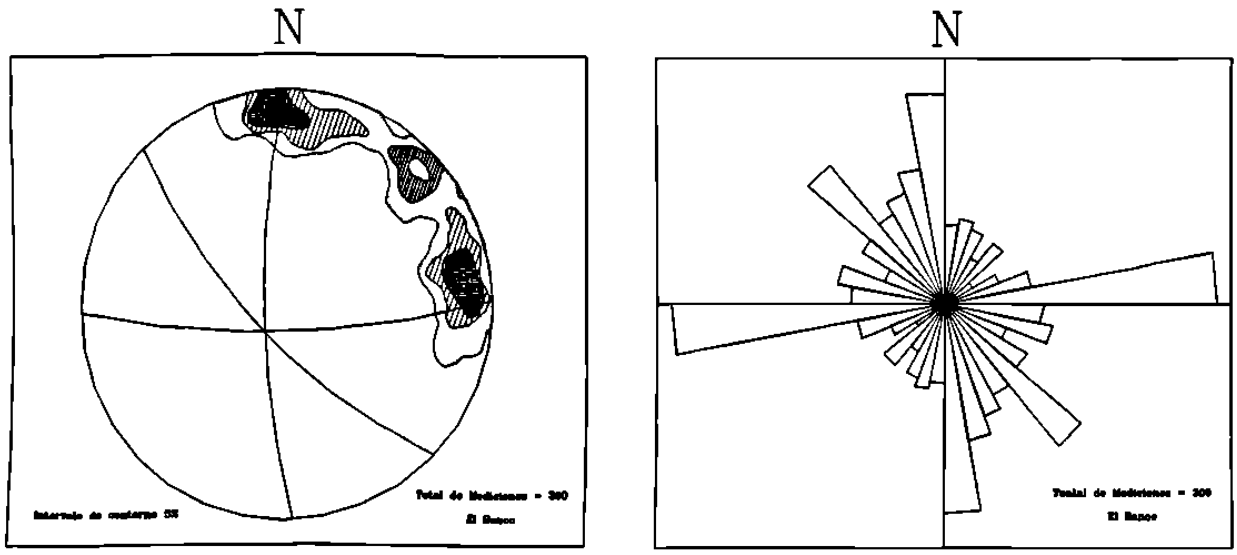

Figura 4.9 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Banco.

Los lugares en donde se tomaron los datos son los antes descritos (La Ceja y El Banco), realizándose mediciones en dos direcciones diferentes. En las Tablas 4.3 y 4.4 se muestran los datos del afloramiento La Ceja 1 y 2, mientras que en las Tablas 4.5 y 4.6 los del afloramiento El Banco 1 y 2, además en la tabla 4.7 se muestran los parámetros estadísticos determinados.

TABLA 4.3

DATOS DE DIACLASAS DEL AFLORAMIENTO LA CEJA 1.

NÚMERO DE FACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)	NÚMERO DE FRACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)
1	108.1	0	6	10.0	0
2	176.8	1	7	45.0	1
3	212.0	0	8	60.0	0
4	6.0	0	9	113.0	0
5	123.0	2	10		1

Espesor de la capa: 15 cm
Tipo de roca: arenisca
Superficie del talud: 225/89
Longitud del perfil: 853.9 cm
Estratificación: 116/10

TABLA 4.4

DATOS DE DIACLASAS DEL AFLORAMIENTO LA CEJA 2.

NÚMERO DE FACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)	NÚMERO DE FRACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)
1	10	0	10	5	5
2	76	2	11	7	0
3	15	2	12	242	0
4	44	1	13	80	0
5	122	0	14	12	1
6	26	3	15	13	2
7	32	0	16	61	0
8	5	0	17		2
9	69	3			

Espesor de la capa: 350 cm
Tipo de roca: arenisca
Superficie del talud: 20/82
Estratificación: 116/10
Longitud del perfil: 819 cm

TABLA 4.5

DATOS DE DIACLASAS DEL AFLORAMIENTO EL BANCO 1.

NÚMERO DE FACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)	NÚMERO DE FRACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)
1	217	0	6	75	0
2	201	0	7	96	0
3	32	0	8	78	0
4	7	0	9		0
5	28	0			

Espesor de la capa: no determinado Tipo de roca: arenisca

Medidas en dirección N30E en el plano de estratificación

Estratificación: 80/6 Longitud del perfil: 734 cm

TABLA 4.6

DATOS DE DIACLASAS DEL AFLORAMIENTO EL BANCO 2.

NÚMERO DE FACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)	NÚMERO DE FRACTURA	SEPARACIÓN (cm)	ABERTURA (mm)
1	62	0	8	9	0
2	9	0	9	33	0
3	20	0	10	59	0
4	15	0	11	715	0
5	2	0	12	66	0
6	37	0	13		0
7	18	0			

Espesor de la capa: no determinado

Tipo de roca: arenisca

Medidas en dirección N20W en el plano de estratificación

Estratificación: 80/6 Longitud del perfil: 1045 cm

En la Tabla 4.7 se presenta el concentrado de datos sobre las fracturas de los cuatro afloramientos, se observa que la distancia promedio de separación entre fractura oscila entre 51.18 a 94.88 cm, quedando, según la clasificación de BARTON *et al.* (1978), entre moderado y amplio.

El espaciamiento de discontinuidades y la asociación de sus conjuntos tienen una fuerte influencia en la permeabilidad de las rocas y sobre las características de filtración en el Vaso de una Presa. En general, la conductividad hidráulica, es inversamente proporcional al espaciamiento; es decir, al aumentar éste, menor será la conductividad hidráulica.

TABLA 4.7

CONCENTRADO DE DATOS PARA ANÁLISIS DE FRACTURAS.

LOCALIDAD	LA CEJA 1	LA CEJA 2	EL BANCO 1	EL BANCO 2
LONGITUD DEL PERFIL (cm)	853.9	819.0	734.0	1045.0
NÚMERO DE FRACTURAS	10	17	9	13
DISTANCIA PROMEDIO ENTRE FRACTURAS	94.88	51.18	91.75	87.08
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	71.17	61.40	78.31	198.96
RUMBO DEL PERFIL SEGÚN ESTRATIFICACIÓN	PERPENDICULAR	PERPENDICULAR	PARALELO	PARALELO
NUMERO DE FRACTURAS POR METRO	1.05	1.95	1.09	1.15
ESPESOR DEL ESTRATO (cm)	15	350		
ABERTURA PROMEDIO (en mm)	0.5	1.2	0	0

Otro factor importante, en el aspecto hidrogeológico, es la abertura de las diaclasas, siendo en este caso del orden de 0.5 a 1.2 mm. Basándonos en los estudios realizados por FRANKLIN y DUSSEAULT (1989), quienes graficaron la apertura de las diaclasas contra la Conductividad hidráulica (Fig. 4.10) tomando en cuenta el número de discontinuidades por metro (en este caso es de una por metro), se puede inferir que la conductividad hidráulica de las rocas en estudio es del orden de 10^{-4} a 10^{-3} m/s.

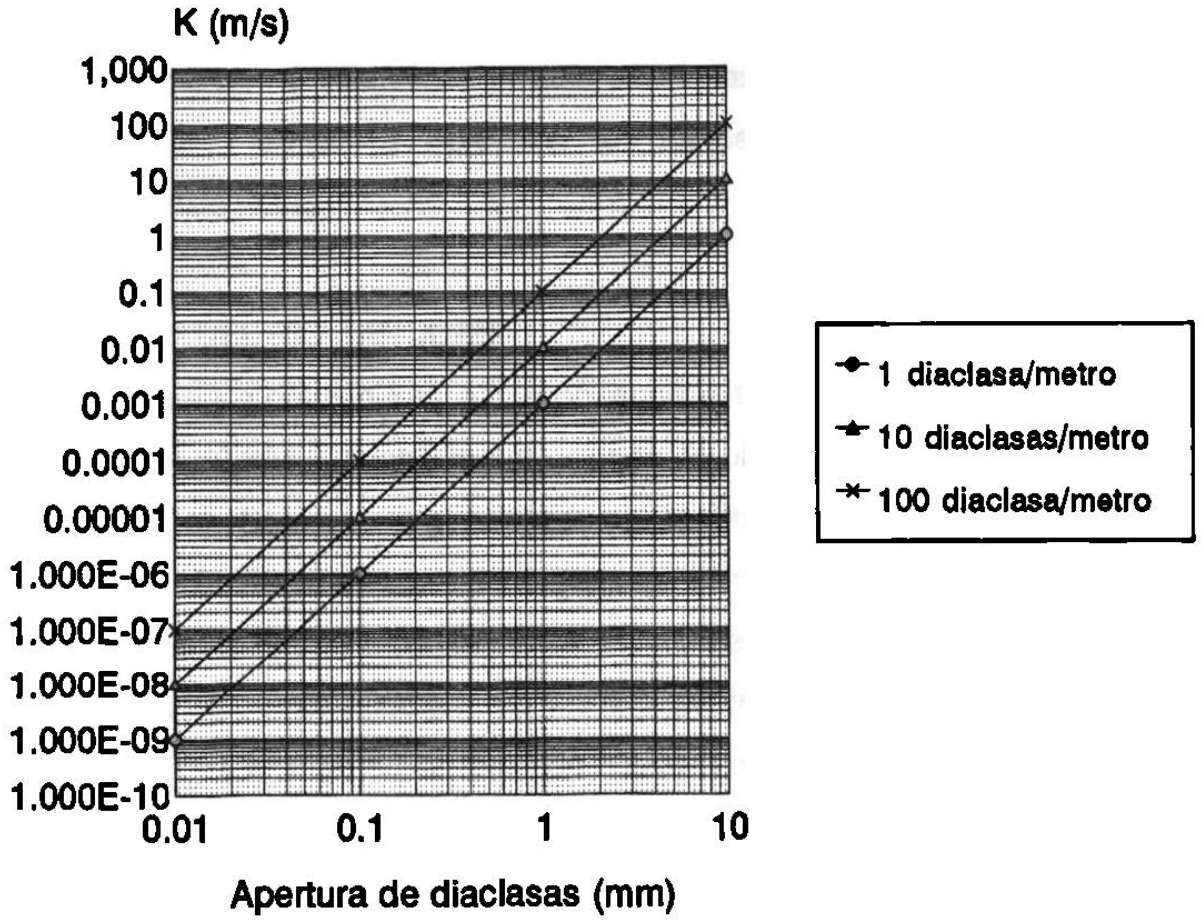

Figura 4.10 Gráfica de apertura de las diaclasas contra Conductividad hidráulica (Tomada de FRANKLIN y DUSSEAULT, 1989).

CAPÍTULO 5
HIDROGEOLOGÍA

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se describieron las características geológicas, petrográficas, estratigráficas y estructurales del área de estudio. En el presente capítulo se muestran las propiedades hidráulicas de las rocas y de la Cuenca del Río San Juan; los datos de piezometría en la Cortina y su interpretación, las filtraciones que han aparecido en el área, así como las características geoquímicas de las aguas (río, Vaso y filtraciones); esta información será la base para presentar los posibles mecanismos de filtración, objetivo principal de este trabajo.

5.2 CUENCA DEL RÍO SAN JUAN

La Cuenca del Río San Juan corresponde a la región NE RH24 abarcando una extensión de 19,804.911 km^2, la mayor parte de ella queda comprendida en el Estado de Nuevo León. La corriente principal es el Río San Juan, que es a su vez afluente del Río Bravo. El Río San Juan tiene su origen en el arroyo La Chueca, mismo que recibe aportaciones de varios pequeños arroyos perennes que bajan de la Sierra Madre Oriental de altitudes de 2000 a 3000 m.s.n.m. La dirección principal de la trayectoria del Río es al NE y a lo largo de su recorrido recibe el aporte de otros importantes afluentes como los Ríos Santa Catarina, Ramos, Pilón y Pesquería, que es su mayor afluente. El Río San Juan descarga finalmente en el Río Bravo al Este de Ciudad Camargo, Tamaulipas (SPP, 1981), habiendo dejado la mayoría de sus aguas en la Presa El Cuchillo y la Presa Marte R. Gómez.

La Presa El Cuchillo se ha construido antes de la unión de los ríos San Juan y Pesquería. El área de la Cuenca hasta el sitio de la Cortina es de 8,924 km^2. Previo a la construcción de la Presa se interpretaron los datos hidrológicos de la Cuenca del período 1933 a 1989, obteniéndose que el escurrimiento anual mínimo es de 30.7 Mm^3, el

máximo de 2,776.5 Mm^3, y el medio de 660 Mm^3. El gasto máximo observado es de 7,500 m^3/s, la avenida de diseño es de 15,080 m^3/s y el período de retorno es de 59 años. La precipitación media anual en el área de la construcción de la Presa es de 537 mm (CNA, 1993).

5.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LAS ROCAS

Las propiedades hidráulicas más importantes en un acuífero son las referentes a transmitir agua (Permeabilidad *k*, Conductividad hidráulica *K* y transmisividad *T*) y a su almacenamiento (Coeficiente de almacenamiento *S*, porosidad η y rendimiento específico S_y; WERNER, 1996).

Con el fin de estudiar las leyes físicas que rigen el movimiento del agua subterránea, Darcy (citado en WERNER, 1996) realizó experimentos en un dispositivo que consta de un tubo vertical de área *A*, relleno de un material (por ejemplo arena) y por donde se induce a pasar un fluido. Este fluido se mantiene con nivel constante.

Darcy mostró que el caudal (*Q*) que se filtra por la columna del material se puede calcular con la ecuación:

$$Q = K A i \qquad (1)$$

Siendo *K* la conductividad hidráulica en m/s, *A* área de sección en m^2 e *i* (sin unidades) el gradiente hidráulico.

La conductividad hidráulica depende tanto de la permeabilidad del acuífero (*k*) como de las propiedades físicas del fluido. Para la conversión de la permeabilidad en conductividad hidráulica se utiliza la relación:

$$k = K \mu / \gamma \qquad (2)$$

donde μ es la viscosidad del fluido en Centipoise y γ es el peso específico en N/m^3.

Otro parámetro hidráulico es la transmisividad (*T*), la que se obtiene del producto de la conductividad hidráulica por el espesor (*h*) del acuífero, esta es:

$$T = K\,h \qquad (3)$$

Siendo las unidades de la transmisividad m^2/s y las de *h*, metros.

La capacidad de las rocas de almacenar agua, así como su capacidad de transmitirla, está determinada por su porosidad η (DAVIS Y DE WEIST, 1971), la cual se define a partir de la ecuación

$$\eta = Vp/Vt \qquad (4)$$

siendo *Vp* el volumen de huecos o poros y *Vt* el volumen total de la roca o material.

La conductividad hidráulica está en función de la porosidad de un material, sin embargo, no es el único factor del que depende. Otro factor muy importante es la geometría de los huecos y su intercomunicación.

En las rocas del área de estudio se han determinado algunos parámetros de los antes mencionados. Durante los trabajos de construcción de la Cortina y el Dique, se realizaron pruebas de ensayo alcanzándose valores de Conductividad hidráulica de$1x10^{-4}$ a $5x10^{-5}$ cm/s (UANL-UEM, 1993a).

Las zonas con mayor permeabilidad en el área del Vaso de la Presa son las constituidas por depósitos aluviales, formaciones deluvio-proluviales, zonas intemperizadas de las areaniscas y lutitas de la formación Mount Selman y probablemente las zonas de intenso fracturamiento. Basándose en estudios de emanación de radón, se determinó que la permeabilidad media de las rocas en el área de la Loma Los Pozos es del orden de 13 cm/s (UANL-UEM, 1993a).

Con el fin de determinar las transmisividades de las rocas, que constituyen los acuíferos en la Loma Los Pozos, NAVARRO (1996) realizó pruebas hidráulicas de desplazamiento y los valores de transmisividad calculados varían de $1x10^{-7}$ a $1.507x10^{-7}$ m^2/s.

En las mismas tres muestras en las que se realizó la petrografía, se efectuó la determinación por duplicado de la porosidad siguiendo la metodología propuesta por FRANKLIN *et al.* (1979). Las pruebas de laboratorio consisten en la determinación de la densidad de roca seca ρ_d, y la determinación de la densidad de la roca saturada de agua ρ_s. Posteriormente se calcula la porosidad con la ecuación:

$$\eta = 100\,(\rho_s - \rho_d)/\rho_s \qquad (5)$$

Los valores de porosidad determinados se encuentran en un rango de 6.233 y 15.765 %, lo que constituye una porosidad media en comparación con los valores reportados por CUSTODIO Y LLAMAS (1976) que para este tipo de rocas (areniscas) tiene valores entre 3 y 25 %. En la tabla 5.1 se presentan los datos obtenidos en el laboratorio para el cálculo de la porosidad de las muestras.

TABLA 5.1

DATOS DE DENSIDAD DE ARENISCAS Y SU POROSIDAD.

AFLORAMIENTO	ρ_d(gr/ml)	ρ_s (gr/ml)	% η
LA CEJA	2.407	2.567	6.233
EL VADO	2.132	2.531	15.765
EL BANCO MIEMBRO CAFÉ	2.216	2.369	6.458
EL BANCO MIEMBRO AZUL	2.507	2.945	14.873

5.4 PIEZOMETRÍA

Como se mencionó en el apartado 3.3.1, en la Cortina de la Presa se instaló instrumentación con el fin de monitorear las condiciones hidrogeológicas. La información es propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y no es posible tener acceso a ella. Sin embargo, se nos proporcionó parte de los registros de 22 piezómetros cuya información comprende el período del 7 de abril al 17 de mayo de 1995. En la Figura 5.1 se presenta la ubicación de los piezómetros a lo largo de la Cortina.

En la Tabla 5.2 se muestran los niveles de los piezómetros del día 24 de abril de 1995, seleccionándose esta fecha por coincidir con la segunda campaña de investigación geofísica (ver apartado 6.2). En una de las columnas de la Tabla se indica la ubicación, según nomenclatura de la obra hidráulica.

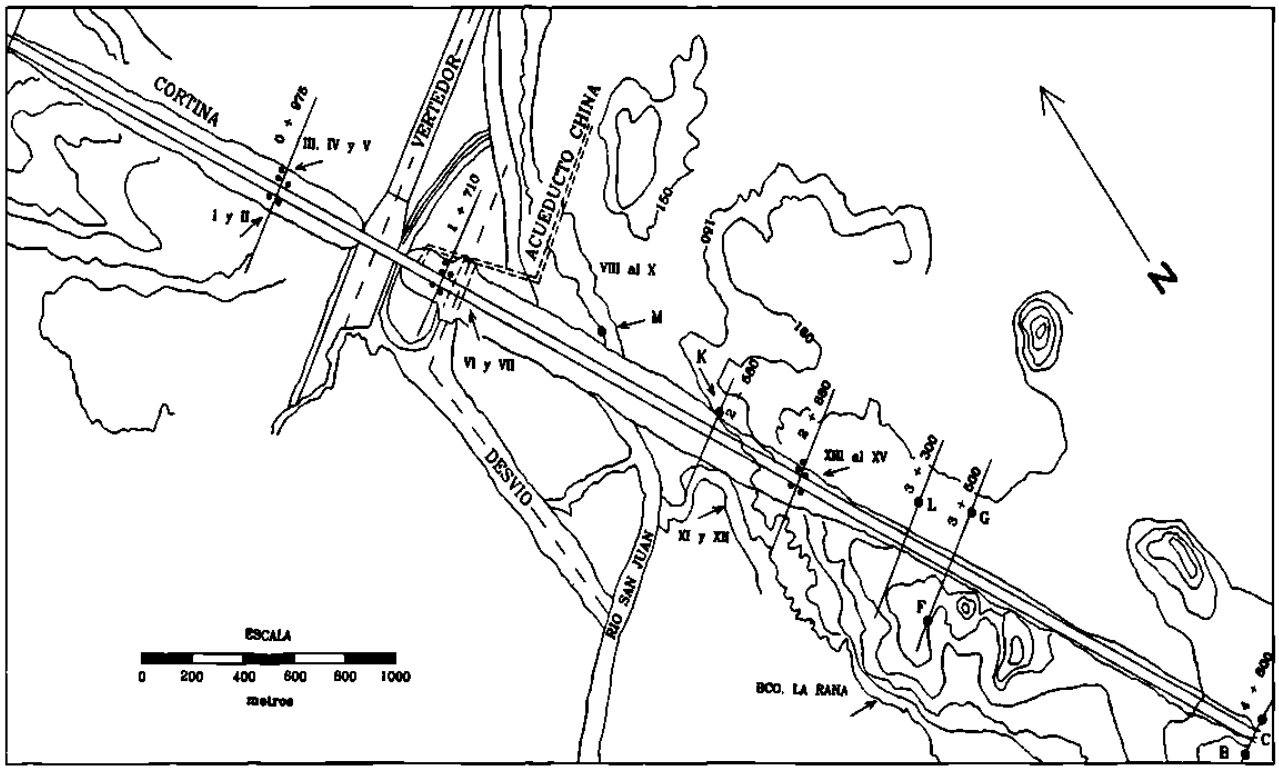

Figura 5.1 Ubicación de los piezómetros a lo largo de la Cortina (las letras mayúsculas y los números romanos indican la ubicación de piezómetros; CNA, 1993).

En la Figura 5.2 se presenta la gráfica de los niveles piezométricos de los instrumentos aguas abajo contra su localización. Se observa que, con respecto al nivel del embalse, los niveles en los piezómetros M, L, y F están por debajo, siendo esto lo esperado; el nivel de G se encuentra sólo 10 cm arriba; mientras que A, B y C están de tres a cuatro metros por arriba y el caso extremo es el H que tiene su nivel a 23.22 metros por arriba de dicho nivel. Las diferencias de nivel podrían deberse a la presencia de varios pisos hidrogeológicos que son cortados por los diferentes piezómetros. De este trabajo se pueden distinguir al menos cuatro pisos: el primero cortado por el piezómetro M; el segundo, por los piezómetros L, F y G; el tercero por los piezómetros A, B y C; y el cuarto cortado por el piezómetrol H.

TABLA 5.2

UBICACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS EN EL ÁREA DE LA CORTINA.

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN	NIVEL DEL AGUA (m.s.n.m.)	PIEZÓMETRO	UBICACIÓN	NIVEL DEL AGUA (m.s.n.m.)
I	0+975	142.80	XIII	2+880	145.37
II	0+975	149.54	XIV	2+880	149.64
III	0+975	145.27	XV	2+880	146.03
IV	0+975	145.84	A	4+800	154.09
V	0+975	134.12	B	4+800	153.44
VI	1+710	148.65	C	4+800	153.24
VII	1+710	147.48	F	3+500	137.08
VIII	1+710	140.72	G	3+500	150.48
IX	1+710	140.69	L	3+300	144.67
X	1+710	137.82	M	2+185	137.35
XI	2+880	141.72	H	5+126	133.36

Datos del 24 de Abril de 1995; el nivel del embalse era de 150.38 m.s.n.m.

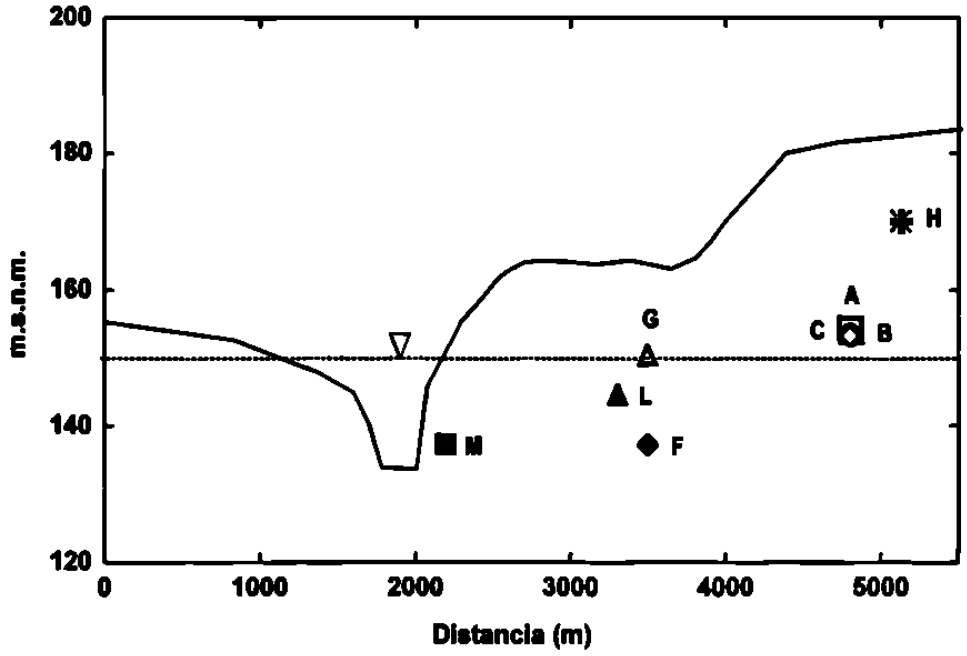

Figura 5.2 Niveles de piezómetros aguas abajo de la Cortina (24 de abril de 1995). La línea continua representa la topografía y la línea punteada el nivel del embalse.

La interpretación anterior coincide con la de NAVARRO (1996), quien estudió el área denominada Loma Los Pozos, localizada al sur del piezómetro H. Dicho autor registró durante dos años, a partir de junio de 1993, el comportamiento del nivel piezométrico del agua en 10 pozos localizados en su zona de estudio y su relación con el llenado de la Presa, además realizó estudios geológicos y geoquímicos de donde concluye que existe un acuífero múltiple de al menos 5 pisos.

5.5 FILTRACIONES

Como resultado de las investigaciones realizadas en el área (UANL-UEM, 1993b) se pronosticó que pudieran existir filtraciones, debido a la existencia de fracturas en direcciones verticales y horizontales, las cuales cortan las lutitas y areniscas sobre las que se construyó el Vaso de la Presa.

Después del inicio (30 de julio de 1993) del llenado de la Presa se presentaron filtraciones al pie de la Cortina y del Dique. La filtración en la Cortina (FC) se localiza en el punto 2+584 m (Fig. 5.3), donde originalmente se había construido un pozo para colocar un piezómetro. Desde ese lugar, hasta el río, existen escurrimientos significativos.

Con el fin de monitorear los gastos de la filtración, la Comisión Nacional del Agua colocó estaciones de medición (vertedores) en diferentes lugares a lo largo de la Cortina. Además se tiene información de las filtraciones dentro de la galería. Esta información, al igual que la de los piezómetros, sólo se nos proporcionó para el mismo periodo (7 de abril al 17 de mayo de 1995). En la Tabla 5.3 se muestran los valores de gasto reportados para las filtraciones de la Cortina. El caudal de las filtraciones reportadas, además de las filtraciones que se observan en las compuertas, confluyen en el antiguo lecho del Río San Juan, aguas abajo de la Cortina (fig. 5.4). Los datos del gasto del río no están disponibles por parte de la CNA, pero se han medido del orden de 250 l/s, lo que supone que existen filtraciones considerables bajo la Cortina.

TABLA 5.3
DATOS DE GASTOS EN LAS FILTRACIONES DE LA CORTINA DE LA PRESA EL CUCHILLO.

Filtración	Gasto (l/s)
Vertedor 1+900	10.29
Galería vertedor derecho	0.8
Galería vertedor izquierdo	1.26
Total en la Cortina	12.35

Existen en el área del Dique dos filtraciones. La primera está localizada a 200 metros al W de la unión de la Cortina con el Dique (Fig. 5.5) frente al sondeo eléctrico vertical cero (ver ANEXO B), su clave para posteriores referencias geoquímicas es FD. Dicha filtración tiene lugar a través de las areniscas que forman las partes topográficas

altas, fluye hacia el E, hasta llegar a un valle y por él sigue hacia el NE hasta el Río San Juan. El gasto en esta filtración se ha determinado que es de 21.77 l/s. La segunda filtración se localiza a 5 km de la unión de la Cortina con el Dique (ver ANEXO B), entre los sondeos 7 y 8 y presenta condiciones topográficas similares a la primera. Ambas filtraciones son intermitentes aunque la primera permanece más tiempo.

Figura 5.3 Filtración al pie de la Cortina vista hacia el NW, (punto 2 + 584 m de la nomenclatura de los piezómetros).

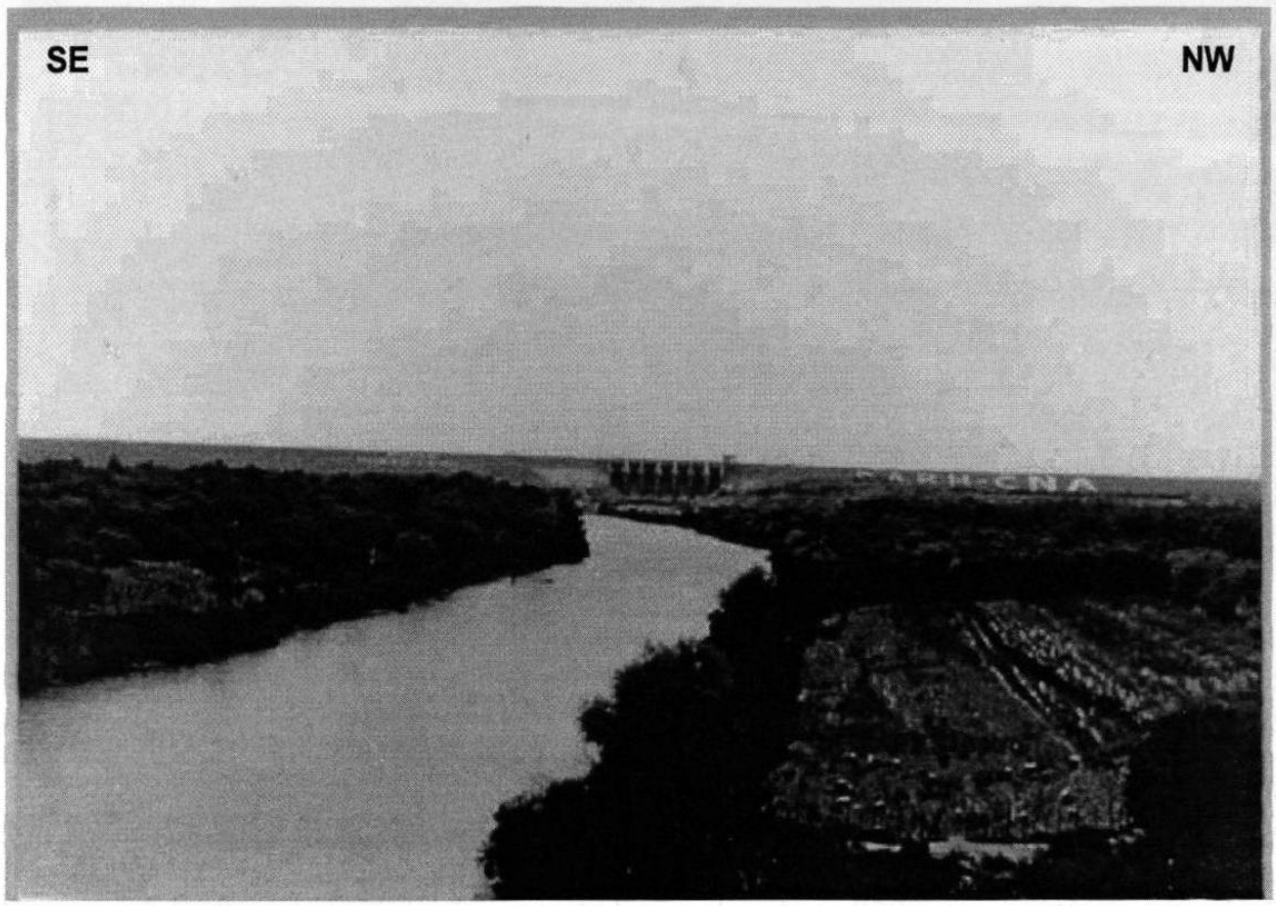

Figura 5.4 Río San Juan aguas abajo de la Cortina en donde confluyen las aguas de las filtraciones.

5.6 ESTUDIOS GEOQUÍMICOS

En el área de la Presa El Cuchillo, en el período 1995-1997 se realizaron muestreos para establecer las variaciones espaciales y temporales en la físico-química de los diferentes sistemas de agua. Los sitios de muestreo se localizan en:

a) El Río San Juan, aproximadamente a 1 km antes de su desembocadura en la Presa. (25° 36' 01" N, 99° 16' 20" W).

a) El Vaso de la Presa frente al Dique (25° 43' 18"N, 99° 17' 29" W).

c) Filtración localizada al pie de la Cortina (25° 42' 10" N, 99° 16' 21 "W).

d) Filtración localizada al pie del Dique, ~200 m al W de la unión de la Cortina con el Dique (25° 43 ' 42"N, 99° 17 ' 28"W).

Figura 5.5 Filtración al pie del Dique vista hacia el norte (a 200 metros al W de la unión de la Cortina con el Dique).

Se realizaron 4 campañas de muestreo en el año de 1995 (el 19 de febrero, el 23 de abril, el 7 de mayo, el 19 de agosto) y el 20 de febrero de 1997. Además de estos muestreos se registraron en otras fechas (6 de septiembre de 1993, 21 de octubre de 1996, 3 de mayo de 1997 y 7 de febrero de 1998), valores de la conductividad eléctrica del agua en los diferentes sitios de muestreo anteriormente señalados. En la Tabla 5.4 se presenta la relación de muestras tomadas, indicándose las fechas de muestreo y las fuentes, así como las claves de las muestras.

Las mediciones de temperatura, pH y conductividad eléctrica se realizaron in situ. El resto de las mediciones se efectuaron en el laboratorio e incluyeron: sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, alcalinidad total, cloruros, sulfatos, dureza total,

dureza parcial, sodio y potasio (Tabla 5.5). La determinación de estos parámetros fue realizada en el Laboratorio de Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Tierra (U.A.N.L.), aplicando métodos normalizados para el análisis de aguas (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

TABLA 5.4

SITIOS DE MUESTREO DE AGUAS Y LAS CAMPAÑAS REALIZADAS.

SITIO Y UBICACIÓN	MUESTREO 1 19 FEB 95	MUESTREO 2 23 ABR 95	MUESTREO 3 7 MAYO 95	MUESTREO 4 19 AGO 95	MUESTREO 5 20 FEB 97
RÍO SAN JUAN	R1	R2	R3	R4	R5
VASO DE LA PRESA	V1	V2	V3	V4	V5
FILTRACIÓN EN CORTINA	*	FC2	FC3	FC4	FC5
FILTRACIÓN EN DIQUE	FD1	*	*	FD4	FD5

*** No fue posible tomar la muestra.**

En las Tablas 5.6 y 5.7 se presentan los resultados de los análisis realizados a las muestras de agua. Los datos obtenidos de los análisis fisico-químicos de las aguas fueron graficados siguiendo el criterio de SCHOELLER (1954). Esto consiste en la construcción de gráficas, colocando en el eje horizontal los iones (cationes y aniones) y en el vertical en escala logarítmica su concentración en miliequivalentes por litro.

El Diagrama de Schoeller es una herramienta muy útil para la representación de resultados de análisis y para distinguir familias o tipos de aguas, pues si tenemos dos aguas con proporciones (cocientes) iguales de iones, pero diferentes concentraciones se ubican en lugares diferentes en la gráfica. Lo anterior no es posible en el diagrama de PIPER (HEM, 1986).

TABLA 5.5

PARÁMETROS DETERMINADOS EN EL ANÁLISIS FISICO-QUÍMICO DE LAS AGUAS Y LOS MÉTODOS NORMÁLIZADOS UTILIZADOS (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Parámetros	Método
Temperatura	Directo con termómetro de mercurio
Conductividad eléctrica	Directo con conductivímetro
pH	Directo con phímetro
Sólidos totales	Gravimétrico a 105°c
Sólidos totales disueltos	Gravimétrico a 105°c
Alcalinidad total	Volumétrico con HCl
Dureza total	Complejométrico con EDTA
Dureza parcial	Complejométrico con EDTA
Cloruros	Argentometálico de Mohr
Sulfato	Gravimétrico con $BaSO_4$
Sodio	Espectrometría de emisión atómica
Potasio	Espectrometría de emisión atómica

En la Figura 5.6 se presentan los diagramas de Schoeller para las aguas del área de la Presa El Cuchillo. En la Figura 5.6 a), referente a las aguas del Río San Juan, se observa que existe diversidad en su composición para las diferentes épocas del año. La concentración de sus principales iones (Ca, Na, HCO_3, Cl y SO_4) se encuentra en la década 1 a 10 me/l; el Mg tiene concentraciones muy variables entre las décadas 0.1 a 10; y el potasio con concentraciones muy bajas (< 0.1 me/l).

Para el caso de las aguas del Vaso (Figura 5.6b) es evidente que, aunque la cantidad de las aguas que le llegan al Vaso varían en el tiempo, los análisis muestran que están homogenizadas debido a que existe un amortiguamiento en la variación. La concentración de los iones Ca, Na, Mg, HCO_3, Cl, y SO_4 se encuentran en la década 1 a 10 me/l, mientras que el potasio muestra valores < 0.2 me/l.

TABLA 5.6

PARÁMETROS DETERMINADOS EN MUESTRAS DEL RÍO SAN JUAN Y DE LA FILTRACIÓN DE LA CORTINA.

Parámetro	R1	R2	R3	R4	R5	FC2	FC3	FC4	FC5
Temperatura (°C)	18.2	23.9	27.0	29.5	18.2	24.3	24.3	24.6	25.9
PH	8.6	8.0	8.5	8.0	7.9	7.0	7.0	7.3	6.7
C.Elec. (mS/cm)	0.790	0.843	0.823	0.592	0.799	1.945	1.900	1.375	1.903
S. Tot. (mg/l)	517	485	549	448	608	1148	1132	996	Nd
S. Dis. (mg/l)	502	468	532	402	491	1083	1100	956	Nd
S. Sus. (mg/l)	15	17	17	46	117	65	32	40	Nd
Alc. T. (mg/l)	147.3	133.0	122.8	186.8	76.1	199.5	201.1	201.8	107.2
D. Tot. (mg/l)	270.2	261.0	262.0	270.9	254.8	548.6	528.3	467.7	677.6
D. Par. (mg/l)	102.7	158.0	244.0	228.8	171.9	296.9	275.0	325.1	488.4
Ca^{+2} (mg/l)	41.10	63.40	97.72	91.60	68.9	118.9	110.1	130.2	195.6
Mg^{+2} (mg/l)	40.70	25.10	4.37	10.20	20.1	61.1	61.5	34.6	45.9
Na^{+} (mg/l)	55.50	57.40	70.90	15.40	50.4	147.5	155.0	94.0	150.3
K^{+} (mg/l)	0.4	0.4	0.4	2.35	4.0	2.80	2.90	2.85	2.90
CO_3^{-2} (mg/l)	5.43	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
HCO_3^{-} (mg/l)	168.6	163.1	137.6	227.9	62.9	254.4	245.3	246.1	130.8
Cl^{-} (mg/l)	65.90	57.10	73.00	23.40	50.00	159.9	158.5	121.4	170.4
SO_4^{-2} (mg/l)	176.5	181.0	184.0	95.50	191.0	422.8	392.0	358.4	626.4
Ca^{+2} (me/l)	2.051	3.164	4.876	4.571	3.438	5.933	5.494	6.497	9.761
Mg^{+2} (me/l)	3.349	2.065	0.360	0.839	1.653	5.028	5.061	2.847	3.776
Na^{+} (me/l)	2.414	2.497	3.084	0.670	2.192	6.416	6.742	4.089	6.538
K^{+} (me/l)	0.010	0.010	0.010	0.060	0.100	0.072	0.074	0.073	0.072
CO_3^{-2} (me/l)	0.181	Nd	Nd	Nd	Nd	0.000	0.000	0.000	0.000
HCO_3^{-} (me/l)	2.763	2.673	2.225	3.735	1.031	3.989	4.020	4.033	2.144
Cl^{-} (me/l)	1.859	1.611	2.059	0.660	1.410	4.510	4.471	3.424	4.807
SO_4^{-2} (me/l)	3.675	3.768	3.831	1.988	3.978	8.803	8.161	7.462	13.04
Err. Reac (%)[a]	-4.00	-2.06	1.07	-1.94	3.29	0.16	1.85	-5.28	0.40

[a]Err. Reac. (%) = $100*[\Sigma (me/l)_{Cat} - \Sigma (me/l)_{An}] / [\Sigma (me/l)_{Cat} + \Sigma (me/l)_{An}]$

Nd – No determinado

Las aguas de la filtración en la Cortina (Figura 5.6c) muestran una mayor concentración de iones que el agua del Vaso. La concentración es de 3 a 10 me/l para todas las especies analizadas, excepto para el potasio, donde su valor es de 0.07 me/l. Por lo anterior, se descarta que el mecanismo de salida de agua sea directa del Vaso y horizontal, más bien parece que existe mezcla con las aguas ya existentes en el acuífero.