

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FILTRACIÓN MEDIANTE
MÉTODOS GEÓLOGO - GEOFÍSICOS EN LA PRESA
EL CUCHILLO - SOLIDARIDAD
CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

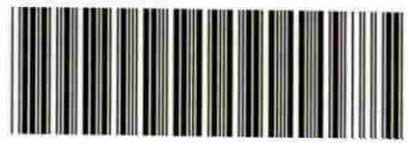
PRESENTA:

JORGE ALBERTO ANDAVERDE ARREDONDO

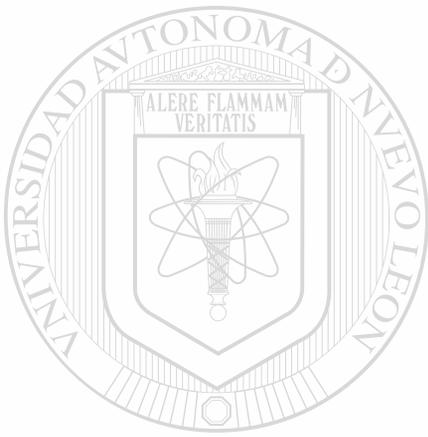
LINARES, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE DE 1999

TM
OC558
V162
8
999
1



1080092569



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FILTRACIÓN MEDIANTE
MÉTODOS GEÓLOGO - GEOFÍSICOS EN LA PRESA
EL CUCHILLO - SOLIDARIDAD
CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

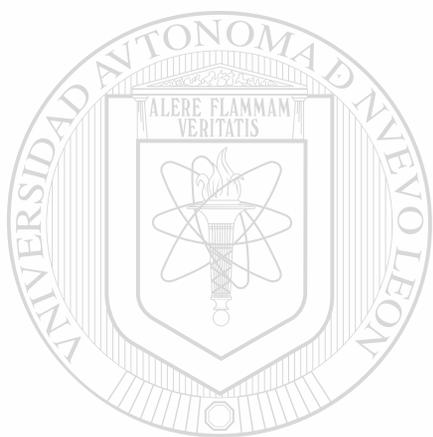
PRESENTA:

JORGE ALBERTO ANDAVERDE ARREDONDO

LINARES, NUEVO LEÓN

DICIEMBRE DE 1999

TC558
.M62
C8
1999



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



La tesis

**DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FILTRACIÓN
MEDIANTE MÉTODOS GEÓLOGO-GEOFÍSICOS EN LA
PRESA EL CUCHILLO-SOLIDARIDAD,
CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

elaborada por

JORGE ALBERTO ANDAVERDE ARREDONDO

ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

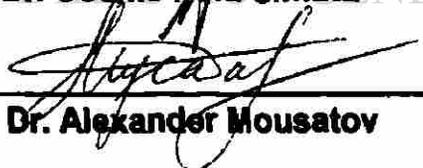
COMITÉ DICTAMINADOR DE LA TESIS



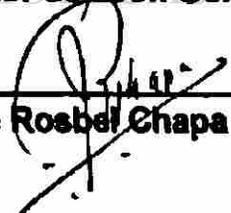
Dr. Cosme Bola Simuta



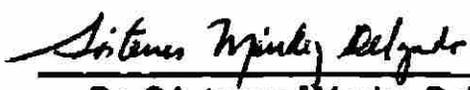
Dr. Héctor de León Gómez



Dr. Alexander Mousatov



Dr. José Rosbel Chapa Guerrero



Dr. Sóstenes Méndez Delgado

Vo.Bo.



Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia
Subdirector de la División de Estudios de Posgrado



La tesis

**DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FILTRACIÓN MEDIANTE
MÉTODOS GEÓLOGO – GEOFÍSICOS EN LA PRESA
EL CUCHILLO – SOLIDARIDAD
CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

Elaborada por

JORGE ALBERTO ANDAVERDE ARREDONDO

**ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado
académico de**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN DE MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

ASESORES

DR. COSME POLO SIMUTA

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

DR. ALEXANDER MOUSATOV

Linares, Nuevo León

Octubre de 1999



**DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FILTRACIÓN
MEDIANTE MÉTODOS GEÓLOGO-GEOFÍSICOS EN LA
PRESA EL CUCHILLO-SOLIDARIDAD,
CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



DEDICATORIA

A Dios, por darme todo lo que tengo

A Jorge y Josefina, por su amor y abnegación

A Panchita, por su cariño y apoyo

A mis hermanos, Héctor y Eduardo por su cariño

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

A mis sobrinos, motivo de gran esperanza

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por haber contribuido a mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca – crédito.

A la Comisión Nacional Del Agua, Gerencia Estatal de Nuevo León (C.N.A. – Nuevo León) por permitirme trabajar en el área de la Presa El Cuchillo – Solidaridad y por la información proporcionada.

Al los Doctores Cosme Pola Simuta y Arkady V. Kalinin por haber fungido como asesores de este trabajo de tesis y especialmente a los Doctores Héctor de León Gómez y Alexander Mousatov por haberme asesorado hasta concluir esta tesis.

A la comisión dictaminadora integrada por los Doctores Cosme Pola Simuta, Héctor de León Gómez, Alexander Mousatov, José Rosbel Chapa Guerrero y Sóstenes Méndez Delgado por sus comentarios y sugerencias que han enriquecido sustancialmente esta tesis.

Al Dr. Javier Castro Larragoitia, Subdirector de Posgrado de la F.C.T., por los ánimos que me dio para concluir este trabajo, así como al M.C. Salvador Guerra Rodríguez y al Lic. Carlos Luis Martínez Castañeda, por su apoyo y comprensión.

A la Maestra Manuelita González por sus ánimos insistentes para terminar este trabajo, y especialmente al Pbro. Salvador Perales, porque juntos han contribuido a formarme en la Sabiduría y Ciencia de Dios, con su ejemplo de vida y entrega.

A Juventino, Paco, Fernando, Ignacio, Pedro y Nelson, quienes me han brindado su amistad y apoyo en todo momento.

A mis compañeros becarios y amigos: Alejandra, Alberto, Efraín, Rolando, Uriel y Salvador, por su amistad al caminar juntos.

A Pedro L. y Jaime que me ayudaron en la presentación de este trabajo.

A todos los estudiantes que me acompañaron al área de estudio, gracias por su ayuda.

ÍNDICE

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tablas.....	v
Nomenclatura y Abreviaturas.....	vii
Resumen.....	ix

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO II

GENERALIDADES.....	3
2.1 Objetivos.....	3
2.2 Metodología.....	3
2.3 Estudios realizados.....	4
2.3.1 Anteriores al presente trabajo.....	4
2.3.2 Estudios realizados en este trabajo.....	5
2.4 Estructura de la tesis.....	5

CAPÍTULO III

FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Ubicación del área de estudio y vías de acceso.....	7
3.2 Climatología y vegetación de la región.....	8
3.3 Presa El Cuchillo Solidaridad.....	9
3.3.1 Construcción de la Presa de almacenamiento.....	9
3.3.2 Construcción del Dique.....	13

CAPÍTULO IV

GEOLOGÍA.....	14
4.1 Introducción.....	14
4.2 Geología regional.....	14
Pre-Terciario.....	15
Terciario.....	16
Estratigrafía del Cenozoico.....	18
Paleoceno.....	18
Eoceno.....	19
Oligoceno.....	21
Mioceno.....	23
Plioceno.....	23
Cuaternario.....	24
4.3 Geología local.....	24
4.4 Geología estructural.....	32

CAPÍTULO V

HIDROGEOLOGÍA.....	41
5.1 Introducción.....	41
5.2 Cuenca del río San Juan.....	41
5.3 Propiedades hidráulicas de las rocas.....	42

5.4 Piezometría.....	45
5.5 Filtraciones	47
5.6 Estudios geoquímicos.....	50
CAPÍTULO VI	
INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS	59
6.1 Introducción	59
6.2 Propiedades eléctricas de las rocas	59
6.3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's)	61
6.4 Perfiles electromagnéticos.....	71
CAPÍTULO VII	
RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	76
7.1 Introducción	76
7.2 Análisis de datos geoquímicos	76
7.3 Análisis de variaciones geofísicas	79
7.3.1 Evaluación del pronóstico (1992)	79
7.3.2 Relación entre parámetros geoelectrónicos e hidrogeológicos	81
7.3.3 Parámetros para pronósticos	82
7.4 Estimación de las propiedades hidráulicas con base en los datos geólogo-geofísicos	87
7.4.1 Datos estructurales	88
7.4.2 Datos de métodos electromagnéticos.....	89
7.4.3 Datos de anisotropía de propiedades físicas	89
7.4.4 Propiedades hidráulicas con base en SEV's	90
7.5 Mecanismos de filtración en el área de estudio.....	92
7.6 Propuesta para futuros estudios en sitios de Presas	95
7.6.1 Estudios a realizarse previos a la construcción	95
7.6.2 Estudios a realizarse posteriores a la construcción	97
CAPÍTULO VIII	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS A Y B	
- DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	
- CARTA GEOLÓGICA-ESTRUCTURAL DE LA PRESA	
EL CUCHILLO-SOLIDARIDAD	I

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
3.1	Ubicación del área de estudio (la zona achurada corresponde al Vaso).	7
3.2	Sección transversal de la Cortina de la Presa El Cuchillo sobre la Formación Mount Selman (modificado de CNA, 1993).	10
4.1	Provincia de Burgos en donde se muestra la distribución de las rocas del Terciario (Modificado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).	17
4.2	Secuencia estratigráfica del Terciario en la Provincia de Burgos (Tomado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).	18
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.	25
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.	28
4.4 b)	Minerales de cuarzo (punteados) y de feldespatos (en blanco) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).	29
4.4 c)	Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).	29
4.4 d)	Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).	30
4.5 a)	Fotografía de la sección delgada de la roca tomada del afloramiento La Ceja. Largo de la fotografía = 0.925 mm.	30
4.5 b)	Minerales de cuarzo (punteados) y de feldespatos (en blanco) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.	31
4.5 c)	Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.	31

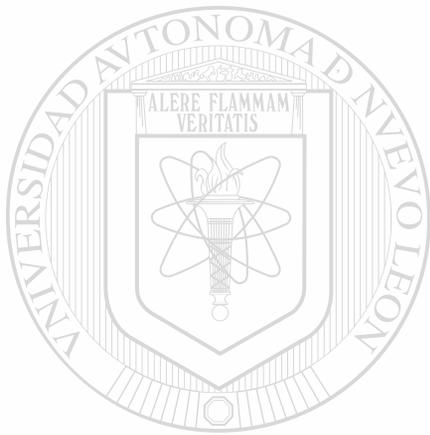
4.5 d)	Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.	32
4.6	Rosa de orientaciones para lineamientos mayores del área de estudio tomados del mapa geológico – estructural.	34
4.7	Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento La Ceja.	34
4.8	Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Vado.	35
4.9	Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Banco.	36
4.10	Gráfica de apertura de las diaclasas contra Conductividad hidráulica (Tomada de FRANKLIN y DUSSEULT, 1989).	40
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).	45
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.	47
5.3	Filtración al pie de la Cortina vista hacia el NW, (punto 2 + 584 m de la nomenclatura de los piezómetros).	49
5.4	Río San Juan aguas abajo de la Cortina en donde confluyen las aguas de las filtraciones.	50
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).	51
5.6	Diagramas de Schoeller para las diferentes aguas de: a) El Río San Juan, b) El Vaso, c) La filtración en la Cortina y d) La filtración en el Dique.	57
5.7	Variación de la conductividad eléctrica de las aguas de la filtración del Dique antes y durante la primera etapa de llenado de la Presa.	58
5.8	Identificación de material que rellena diaclasas por medio de Rayos-X.	58

6.1	Medio estratificado utilizado para la definición de la resistencia transversal unitaria (Modificado de ORELLANA, 1982).	61
6.2	Arreglo Schlumberger empleado para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales (Modificado de ORELLANA, 1982).	62
6.3	Secciones de resistividad aparente del área del Dique para los años 1992, 1995 y 1997.	65
6.4	Curvas de resistividad aparente para las tres campañas en el SEV 3.	66
6.5	Secciones geoelectricas a lo largo del Dique para el año a) 1992, b) 1995 y c) 1997.	69
6.6	Sección geoelectrica a lo largo de la Cortina para el año 1995.	71
6.7	Configuración de las bobinas utilizadas en la investigación (modificada de MÉNDEZ-DELGADO, 1999).	73
6.8	Variación de conductividad aparente obtenida con el modo de bobinas verticales coplanares a lo largo del Dique (los números en la parte de abajo corresponden a los SEV's).	74
7.1	Gráfica de Schoeller para las diferentes aguas del área de estudio.	77
7.2	Relación entre la conductividad hidráulica, porosidad y resistividad para diferentes tipos de sedimentos (Tomada de MAZAC <i>et al.</i> , 1985).	82
7.3	Gráfica de los valores de T para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.	86
7.4	Gráfica de los valores de T_m para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.	87
7.5	Elementos estructurales (diacclasas y estratificación) para el área de estudio.	88
7.6.	Modelo de ascenso del nivel freático en el área del Dique para un corte geológico perpendicular al Dique cerca del sondeo cero.	94

**ANEXO Curvas de resistividad aparente para los sondeos cero al diez, a
A lo largo del Dique, en las diferentes campañas.**

V

**ANEXO Carta Geológico – Estructural Presa El Cuchillo – Solidaridad
B**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
3.1	Instrumentación colocada en la Cortina de la Presa El Cuchillo.	13
4.1	Análisis mineralógico (expresado en porcentajes).	27
4.2	Datos de rumbos de lineamientos y sus respectivos porcentajes.	33
4.3	Datos de diaclasas del afloramiento la Ceja 1.	37
4.4	Datos de diaclasas del afloramiento la Ceja 2.	37
4.5	Datos de diaclasas del afloramiento el Banco 1.	38
4.6	Datos de diaclasas del afloramiento el Banco 2.	38
4.7	Concentrado de datos para análisis de fracturas.	39
5.1	Datos de densidad de areniscas y su porosidad.	44
5.2	Ubicación de los piezómetros en el área de la Cortina.	46
5.3	Datos de gastos en las filtraciones de la Cortina de la Presa El Cuchillo.	48
5.4	Sitios de muestreo de aguas y las campañas realizadas.	52
5.5	Parámetros determinados en el análisis físico-químico de las aguas y los métodos normalizados utilizados (APHA-AWWA-WPCF, 1992).	53
5.6	Parámetros determinados en muestras del Río San Juan y de la filtración de la Cortina.	54
5.7	Parámetros determinados en muestras del Vaso y de la filtración del Dique.	55
6.1	Profundidad de exploración del equipo EM-34-3 para varias separaciones entre bobinas (Tomada de MCNEILL, 1980).	72
7.1	Datos para el cálculo de proporción de mezcla y los resultados obtenidos.	78
7.2	Resultados de la interpretación para los SEV's de 1992.	84
7.3	Resultados de la interpretación para los SEV's de 1995.	84
7.4	Resultados de la interpretación para los SEV's de 1997.	85

7.5	Cocientes de resistencia transversal para diferentes tiempos	85
A 1	Ubicación de los sondeos eléctricos verticales a lo largo del Dique.	I
A 2	Ubicación de los sondeos eléctricos verticales a lo largo de la Cortina.	I
A 3	Datos de SEV's en el Dique para el año 1992.	II
A 4	Datos de SEV's en el Dique para el año 1995.	III
A 5	Datos de SEV's en el Dique para el año 1997.	III
A 6	Datos de SEV's realizados a lo largo de la Cortina de la Presa El Cuchillo en abril de 1995.	IV



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

A	área
°C	grados Celsius
cm	centímetros
cm/s	centímetros por segundo
D	Diaclasas
Es	Estratificación
f	frecuencia
Fm	formación
gr/ml	gramos por mililitro
h	espesor de una capa
H	espesor total
i	gradiente hidráulico
I	corriente eléctrica
k	permeabilidad hidráulica
K	conductividad hidráulica
kg/cm²	kilogramos por centímetro cuadrado
km	kilómetros
km²	kilómetros cuadrados
l/s	litros por segundo
m	metros
m	parámetro de cementación
m³	metros cúbicos
me/l	miliequivalentes por litros
mm	milímetros
Mm³	millones de metros cúbicos
m/Ma	metros por millón de años
mS/cm	milisiemens por centímetro
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
m/s	metros por segundo
m²/s	metros cuadrados por segundo
m³/s	metros cúbicos por segundo
Nd	No determinado
N/m³	Newton por metro cúbico
N.T.	nivel del terreno
Ohm-m	ohm-metros
pH	potencial de Hidrógeno
Q	caudal
s	separación entre bobinas
S	coeficiente de almacenamiento, conductancia longitudinal o saturación
S_y	Rendimiento específico
T	transmisividad
T_i	resistencia transversal unitaria
T_m	resistencia transversal modificada

V	Voltios
V_p	Volumen de poros
V_t	Volumen total
γ	peso específico
η	porosidad
μ	viscosidad de un fluido
ρ_a	resistividad aparente, resistividad del agua
ρ_d	densidad de la roca seca
ρ_s	densidad de la roca saturada
σ_a	conductividad aparente

AEB	Afloramiento El Banco
AEV	Afloramiento El Vado
ALC	Afloramiento La Ceja
APHA	Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association)
AWWA	Asociación Americana de trabajo sobre agua (American Water Works Association)
Cd.	Ciudad
CNA	Comisión Nacional del Agua
EDTA	Acido Etilendiaminotetracético
FC	Filtración de la Cortina
FD	Filtración del Dique
INEGI	Instituto Nacional de Geografía e Informática
NAME	Nivel de Aguas Máximo Extraordinario
NAMO	Nivel de Aguas Máximo Ordinario
N.L.	Nuevo León
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SPP	Secretaría de Programación y Presupuesto
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UEM	Universidad Estatal de Moscú
WPCF	Federación para el control de contaminación en aguas (Water Pollution Control Federation)

RESUMEN

El abastecimiento de agua con fines domésticos, municipales e industriales para Monterrey y su área metropolitana ha provocado que, además de las fuentes subterráneas (pozos, socavones y galerías), se tengan que construir fuentes superficiales de agua (Presas) como la de El Cuchillo en China N.L., la cual tiene una capacidad máxima extraordinaria de 1,784 Mm³.

Antes, durante y después de la construcción de una obra de almacenamiento superficial se realizan una serie de estudios con el fin de determinar sus características de la zona, el estado de las obras construidas y los cambios en el régimen hidrogeológico. Los estudios que se realizan son geológicos, geoquímicos y geofísicos, con los cuales se investigan las propiedades de las rocas y de los fluidos que pudieran contener. El presente trabajo tuvo como objetivo principal la determinación de los mecanismos de filtración de agua que tienen lugar en la Presa El Cuchillo. Para lograr el objetivo se integraron métodos de las geociencias.

Los estudios geológicos revelan que la Presa se construyó sobre una alternancia de areniscas y lutitas de edad Terciaria (Eoceno), pertenecientes al miembro Queen City de la Formación Mount Selman. Estas rocas presentan direcciones NNW-SSE y un buzamiento de 6 - 10° al ENE en forma homoclinal. La profundidad del intemperismo en estas rocas, según estudios realizados en pozos, alcanza una profundidad aproximada de 15 metros. Este intemperismo aunado a los diferentes sistemas de fracturamiento que cruzan perpendicularmente la Cortina y el Dique y a la porosidad de las areniscas (del orden de 6 – 15 %), generan filtraciones al pie del Dique y la Cortina con gasto total de 250 l/s.

Los datos de los piezómetros revelan que en la zona de la Cortina existe un acuífero múltiple, compuesto de cuatro pisos hidrogeológicos. Los estudios geoquímicos de las aguas del Vaso y de las filtraciones ponen en evidencia que las

agua del acuífero múltiple, antes mencionado, están mezclándose temporalmente al aumentar el nivel del embalse, en una proporción de 1 a 5, respectivamente.

Las investigaciones geofísicas nos permiten determinar los cambios en el régimen hidrogeológico, aguas abajo del Dique; siendo evidente la variación de los valores de resistividad específica por el cambio en el grado de saturación de las rocas. Por otra parte, las investigaciones geofísicas nos permiten pronosticar, mediante el cálculo de la resistencia transversal modificada, las zonas que tienen un alto potencial de filtración, como es el caso de las áreas de los extremos del Dique, principalmente. De los estudios de resistividad se pudo calcular la porosidad integral de las rocas, resultando que es del orden de 20 – 35 %; así mismo, se ha podido calcular la resistividad del agua del acuífero para el año de 1992, siendo muy semejante a la reportada para las aguas de las perforaciones de la Loma Los Pozos, Dique natural de la Presa.

De la integración de los estudios geólogo – geofísicos se pudo determinar el mecanismo de filtración. En la parte Este del Dique dicho mecanismo considera que las aguas del Vaso se mezclan con las del acuífero original y ascienden por las areniscas, considerando condiciones geológicas de fracturas y porosidad alta. Para el extremo Oeste del Dique, el mecanismo de filtración está relacionado con flujos laterales, provocados por la diferencia de nivel entre las aguas de la Presa y los niveles topográficos aguas abajo del Dique. Por último, se presenta una propuesta metodológica a ser usada en los diseños futuros de sitios para Presas, proponiéndose la integración de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas.

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 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (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 $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$ (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 $1.48 \text{ m}^3/\text{s}$; y José López Portillo (Cerro Prieto), en Linares, N.L., con un aporte de $2.61 \text{ m}^3/\text{s}$. En suma, el suministro de las fuentes anteriores es de $8.74 \text{ m}^3/\text{s}$, existiendo un déficit de $6.26 \text{ m}^3/\text{s}$ (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 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 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

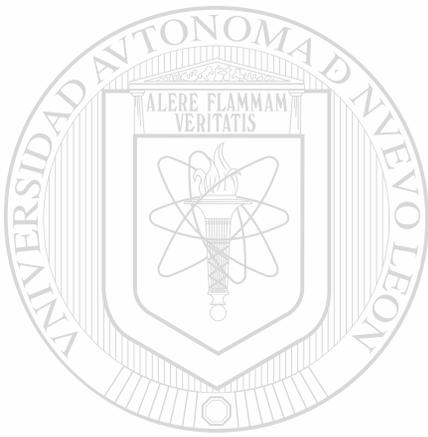
Los trabajos realizados, para esta investigación, consistieron en determinar las condiciones geológicas de las rocas en cuanto a su petrografía, porosidad, grado de fracturación y el tipo de acuífero que existía en el lugar. Por otro lado, mediante estudios geoquímicos se caracterizaron los diferentes 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.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 $25^{\circ} 43'$ latitud Norte y $99^{\circ} 17'$ longitud Oeste, 3 km al NW de la población de China.

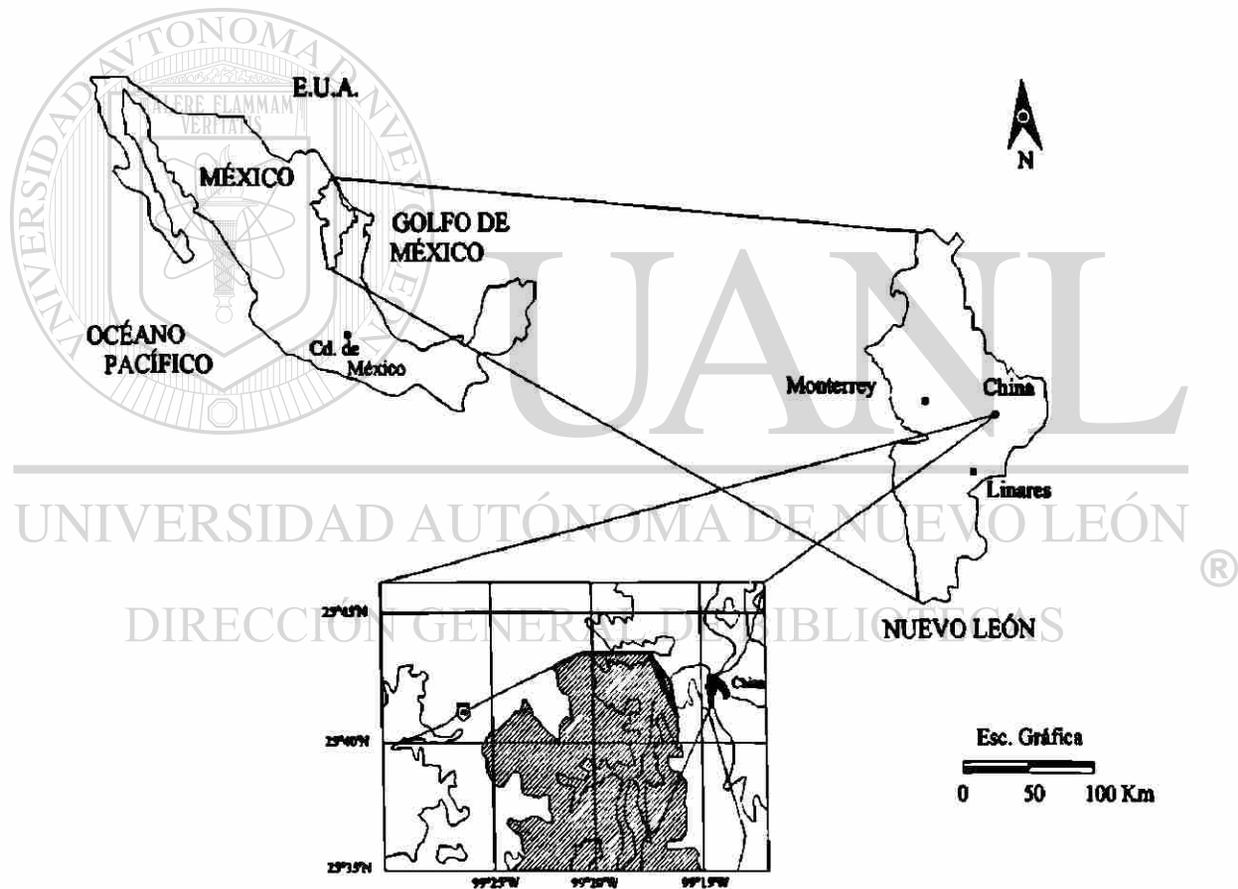


Figura 3.1 Ubicación del área de estudio (la zona achurada corresponde al Vaso).

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 extremo 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 (*Koerberlinia spinosa*), nopal (*Opuntia lindheimen*), pitaya (*Echinocereus enneacanthus*), maguey (*Agave sp.*) y anacahuíta (*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 Mm³ al nivel del NAME (166.66 m.s.n.m.) La capacidad útil es de 1,123 Mm³ en el nivel de NAMO (162.35 m.s.n.m.). El área del embalse es de 180.9172 km² al NAME y de 127.9489 km² 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 (*Portiera angustifolia*), coyotillo (*Karwinskia humboltiana*), salvia (*Croton torreyllanus*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), sangre de dragón (*Jatropha dioica*), huizache (*Acacia famesiana*), abrojo (*Koeberlinia spinosa*), nopal (*Opuntia lindheimen*), pitaya (*Echinocereus enneacanthus*), maguey (*Agave sp.*) y anacahuíta (*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

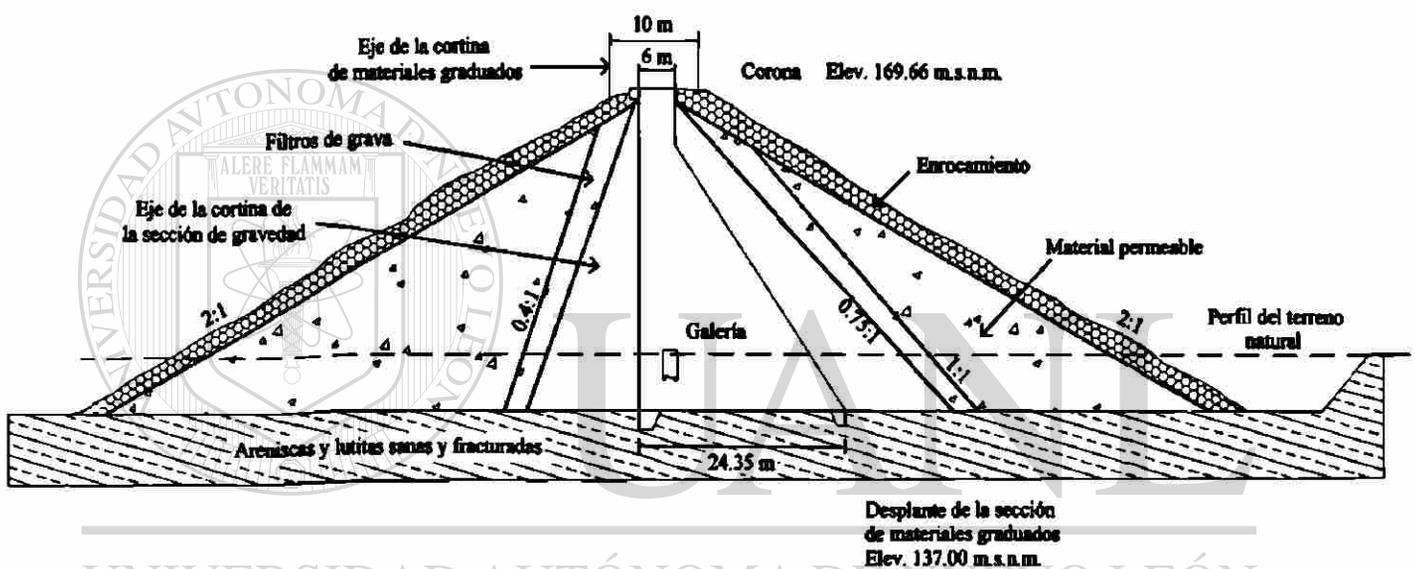
Los trabajos de construcción de la Presa se iniciaron a finales de noviembre de 1990 y fue inaugurada el 17 de octubre de 1994. El Vaso tiene una capacidad total de almacenamiento de 1,784.7 Mm³ al nivel del NAME (166.66 m.s.n.m.) La capacidad útil es de 1,123 Mm³ en el nivel de NAMO (162.35 m.s.n.m.). El área del embalse es de 180.9172 km² al NAME y de 127.9489 km² 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).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

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/cm² 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/cm² 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.

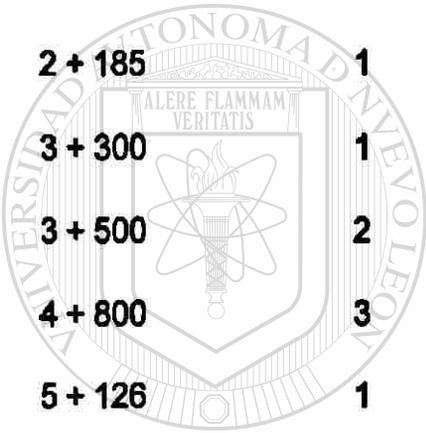
Una vez efectuada la limpieza para el desplante en el cauce del río, en el canal de desvío y en la zona del Dique, se descubrió una serie de fracturas verticales que cruzaban diagonalmente el eje de la Cortina. Algunas de las fracturas estaban abiertas y vacías, otras rellenas de arcillas, considerándose 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/cm². 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	—	—	—



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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 km², 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) Subsistencia 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 Turoniano 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.

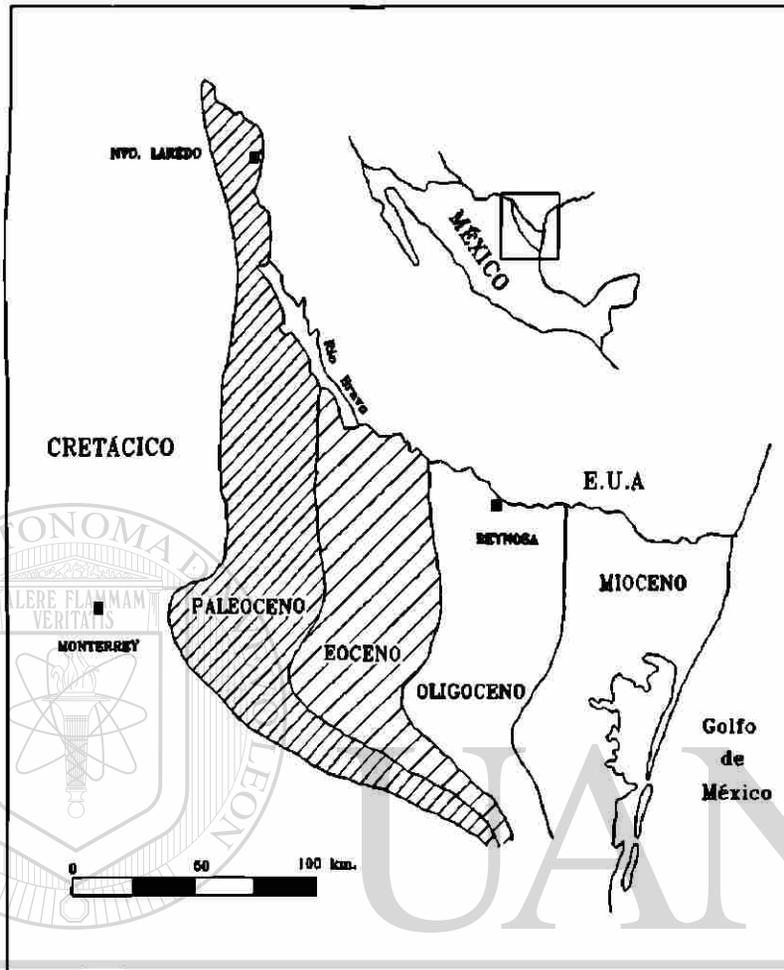


Figura 4.1 Provincia de Burgos en donde se muestra la distribución de las rocas del Terciario (Modificado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).

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.

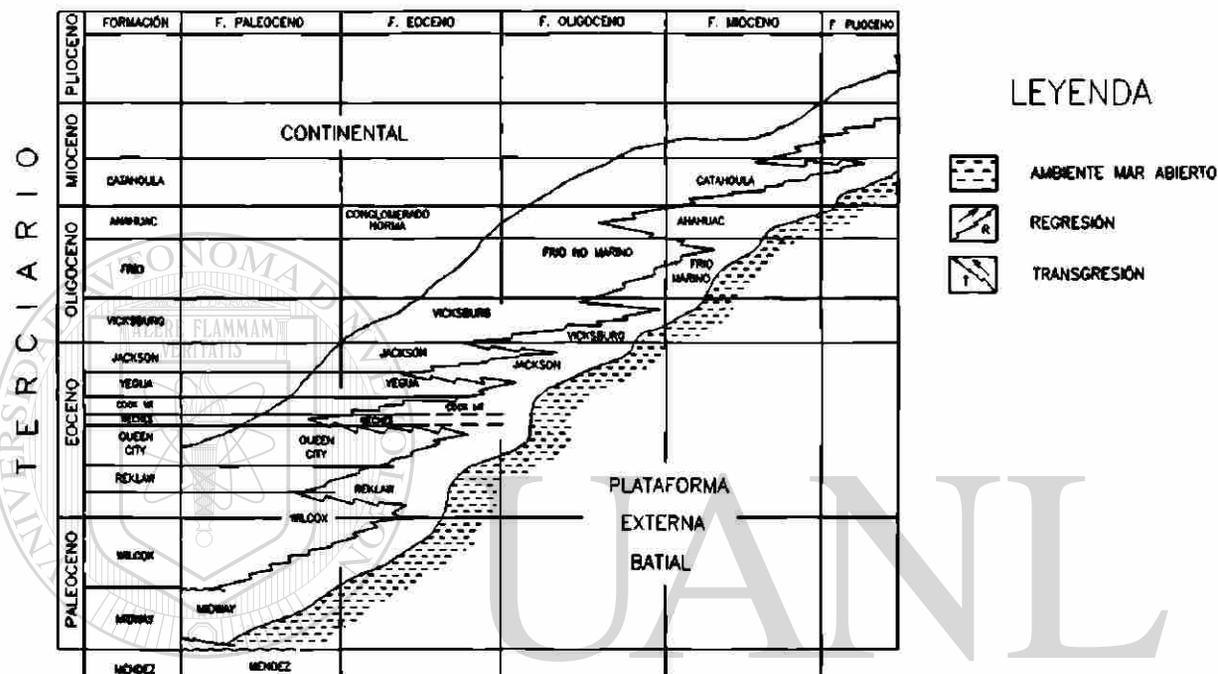


Figura 4.2 Secuencia estratigráfica del Terciario en la Provincia de Burgos (Tomado de ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986).

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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 microfósiles. En su parte superior se presentan concreciones ferruginosas oscuras.

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 ostras. 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 foraminíferos, 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 suprayacente 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 foraminíferos 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 km². 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 hierro.

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 5×10^{-4} cm/s (CNA, 1993).

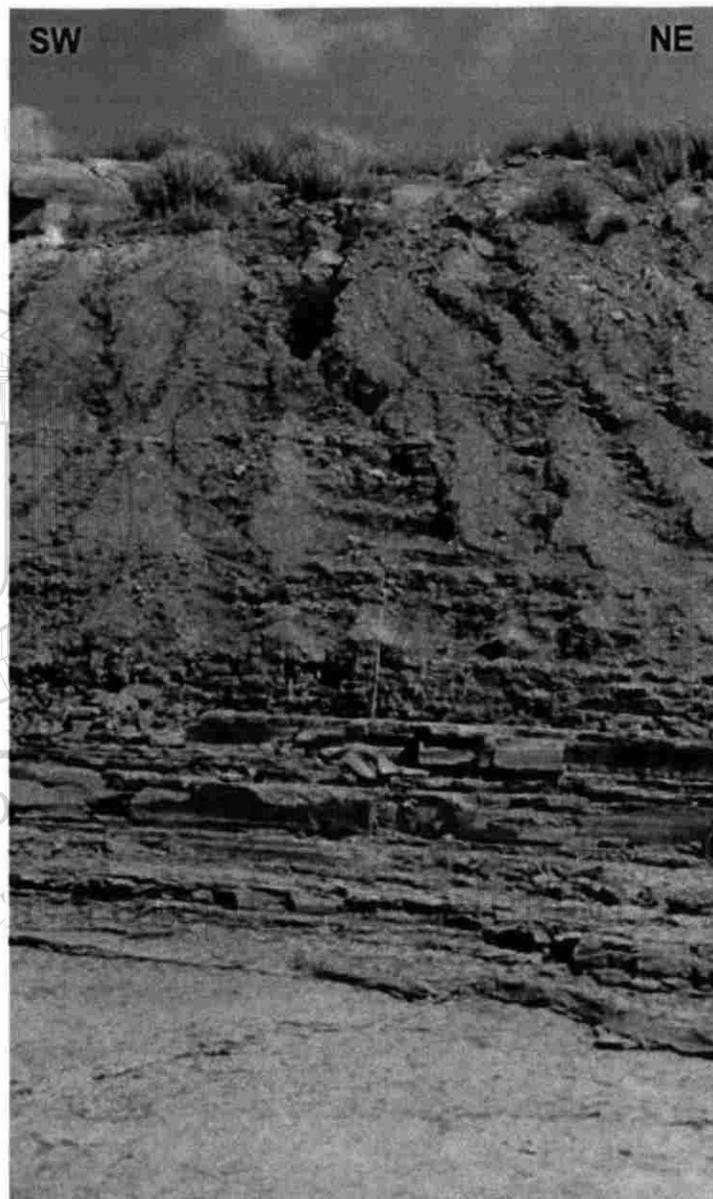


Figura 4.3 Secuencia de areniscas y lutitas arenosas de la Formación Mount Selman, en un corte en la obra de toma para riego, aproximadamente 200 m al norte de la Cortina.

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:

Afloramiento La Ceja 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).

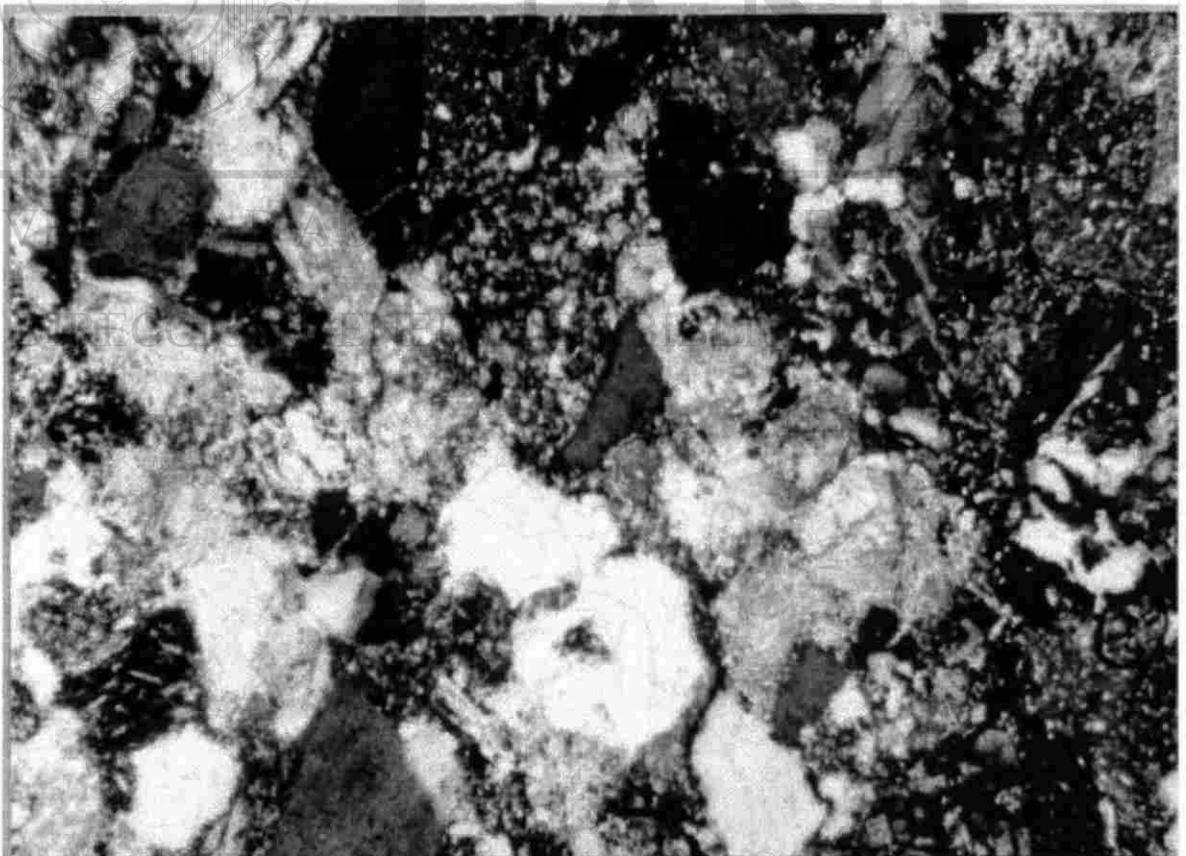


Figura 4.4 a) Fotografía de la sección delgada de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul). Largo de la fotografía = 0.925 mm.



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

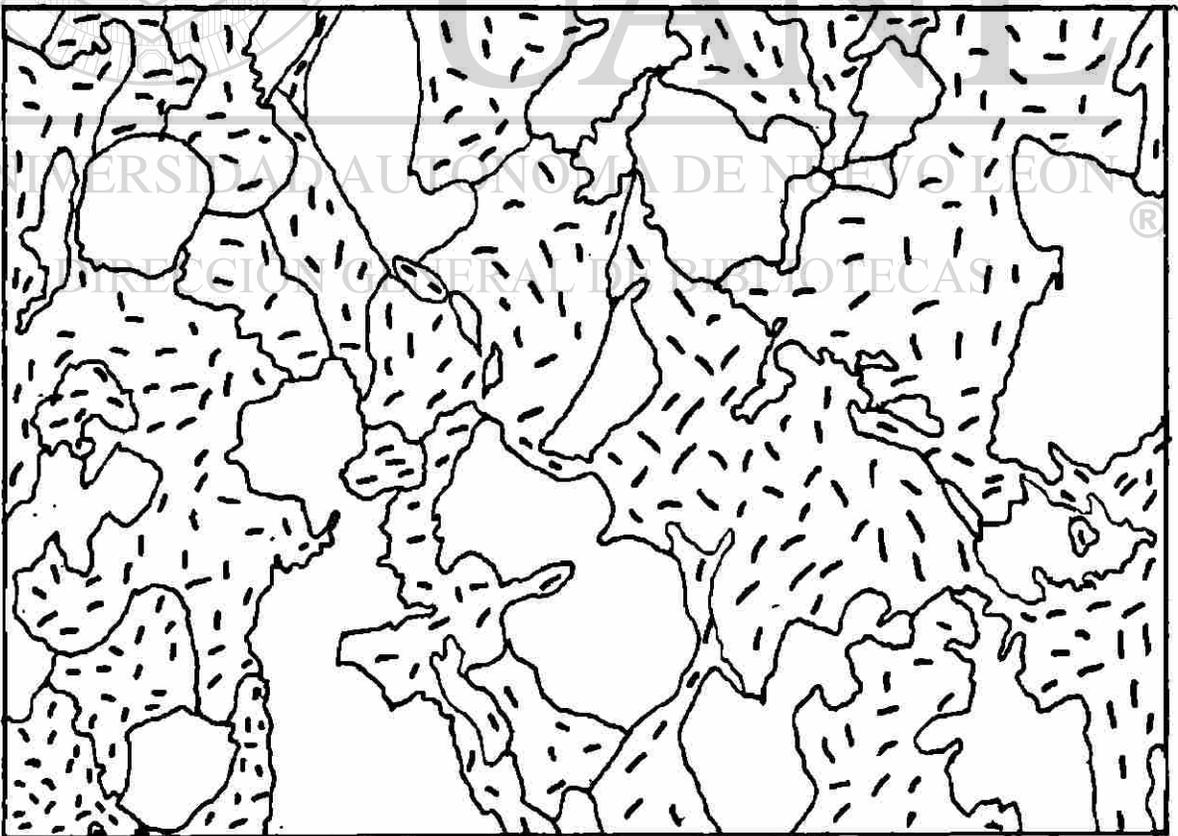


Figura 4.4 c) Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).

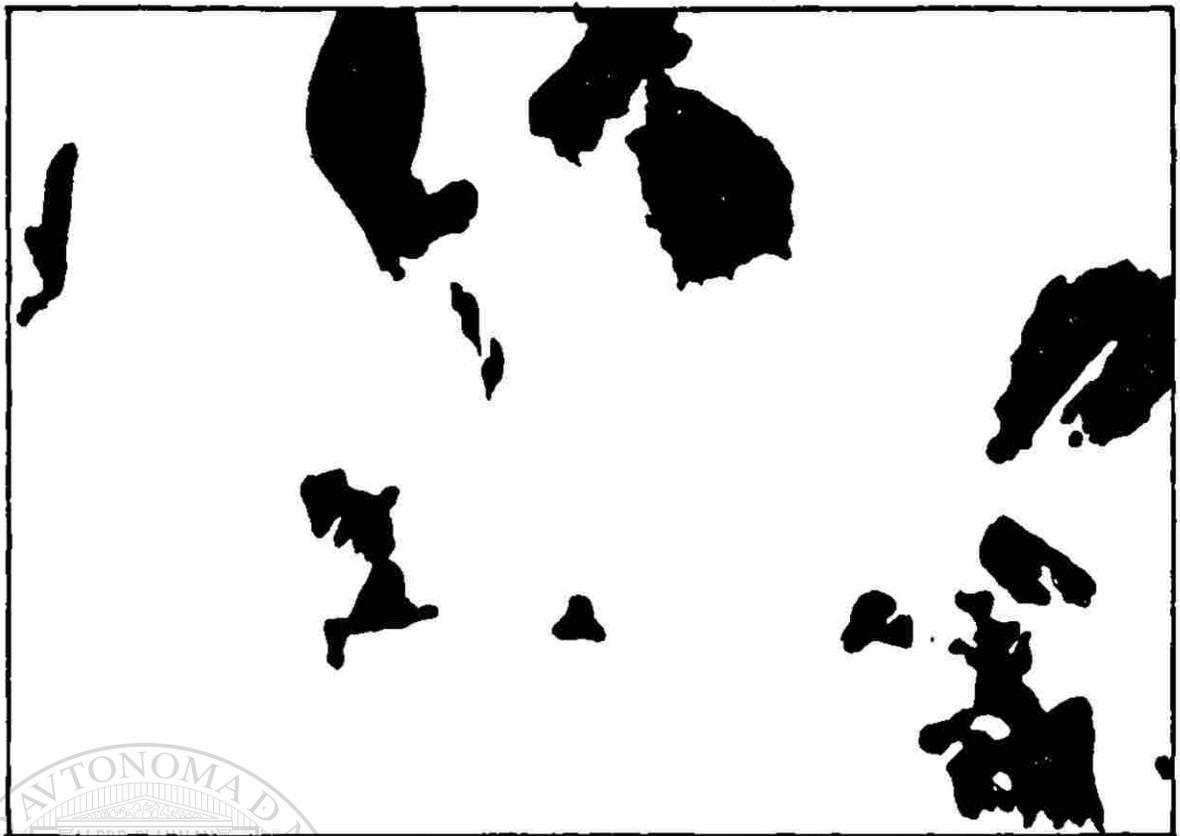


Figura 4.4 d) Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento El Banco (miembro azul).

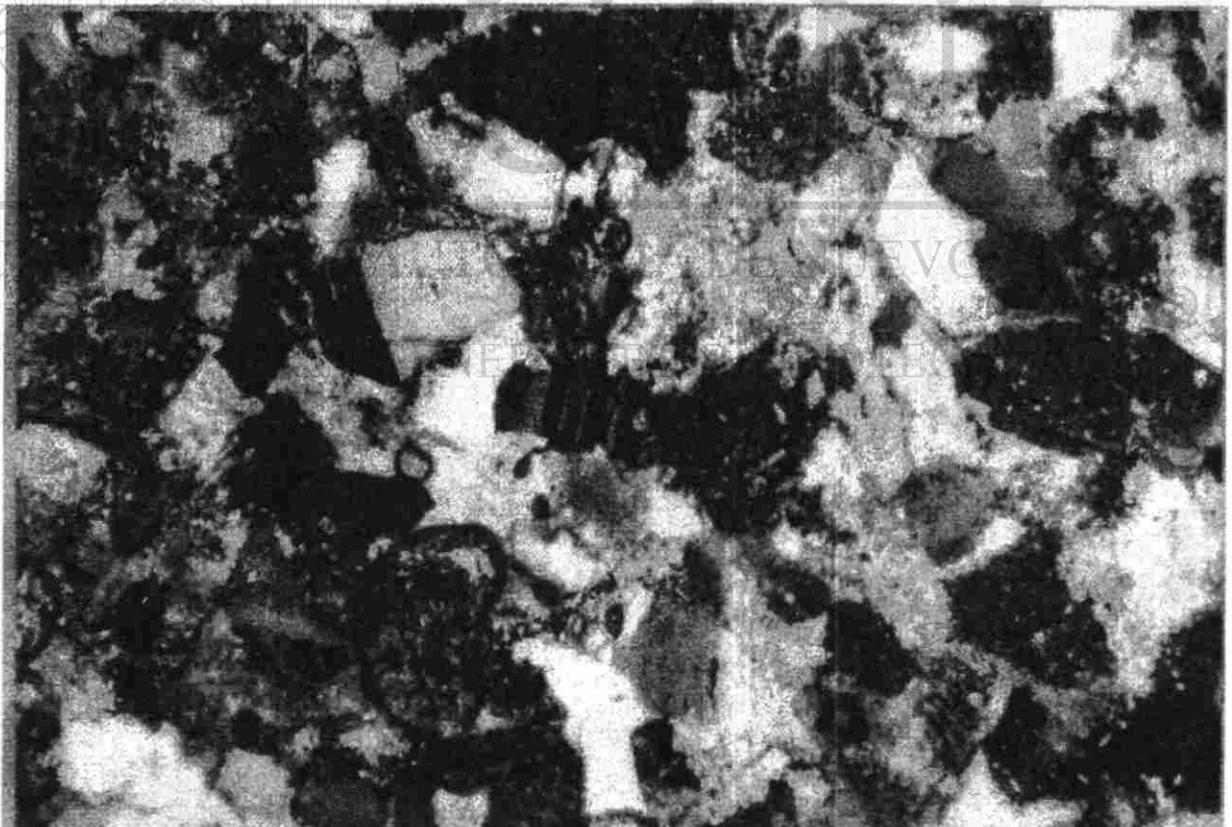


Figura 4.5 a) Fotografía de la sección delgada de la roca tomada del afloramiento La Ceja. Largo de la fotografía = 0.925 mm.



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

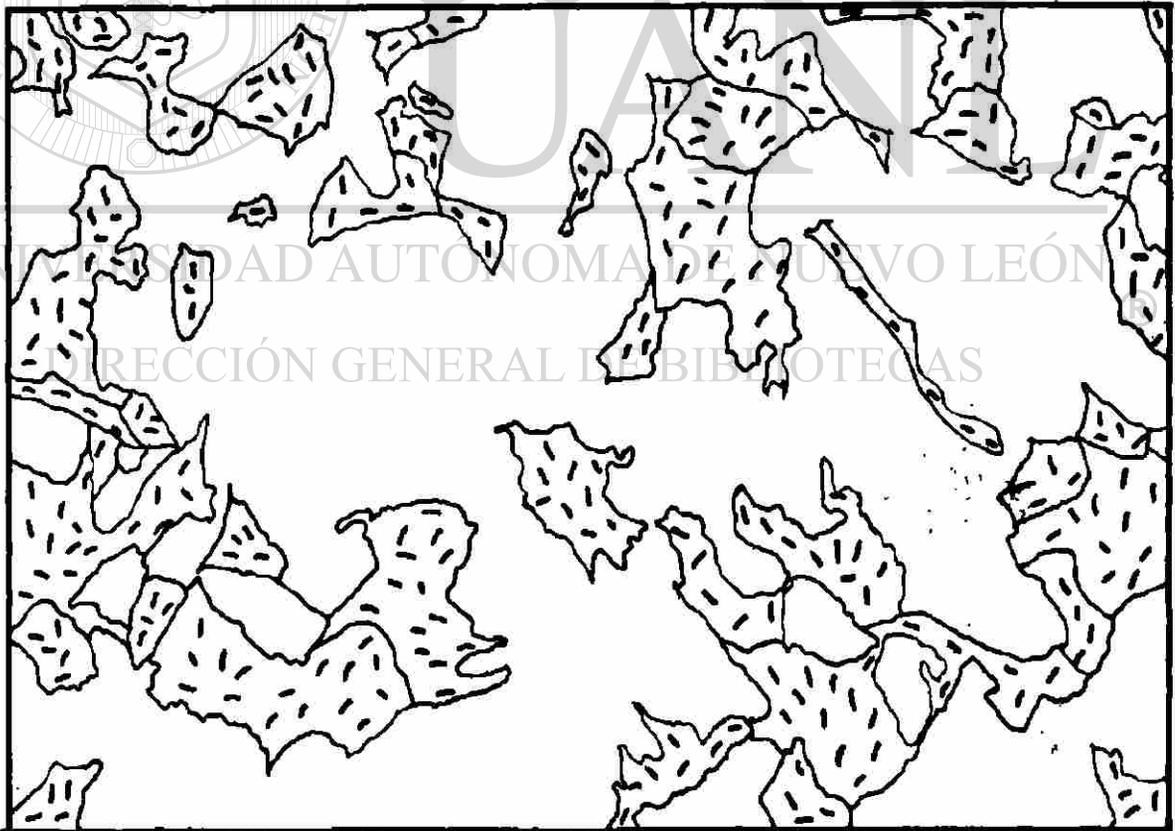


Figura 4.5 c) Minerales de calcita y arcilla (en rayas) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.

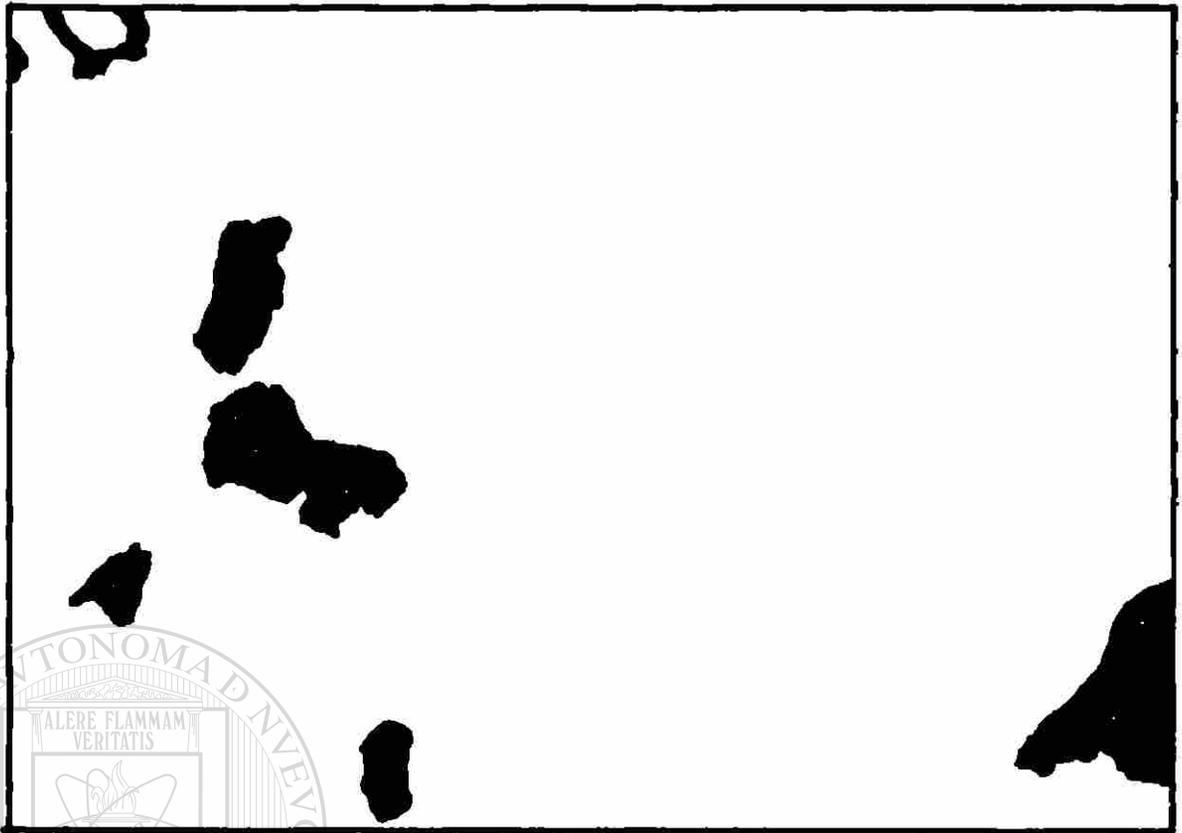


Figura 4.5 d) Huecos (en negro) de la roca tomada del afloramiento La Ceja.

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 DUSSEULT (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.

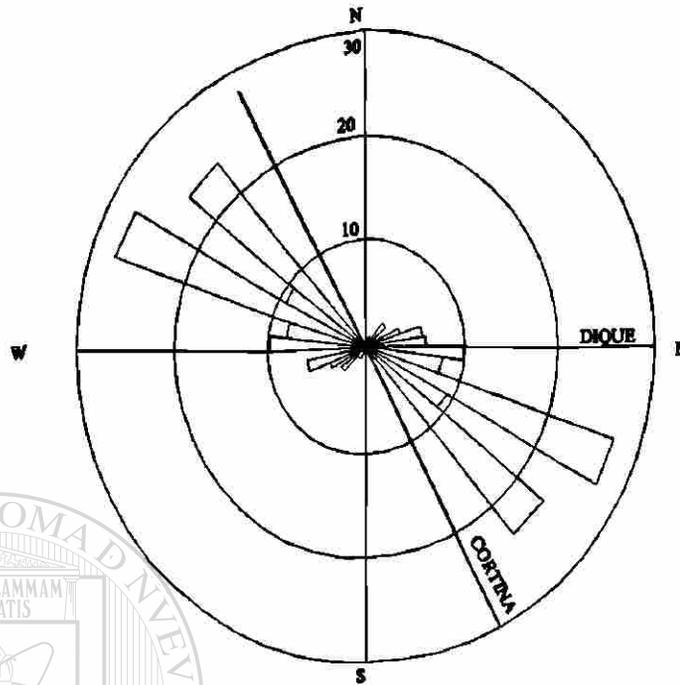


Figura 4.6 Rosa de orientaciones para lineamientos mayores del área de estudio tomados del mapa geológico - estructural.

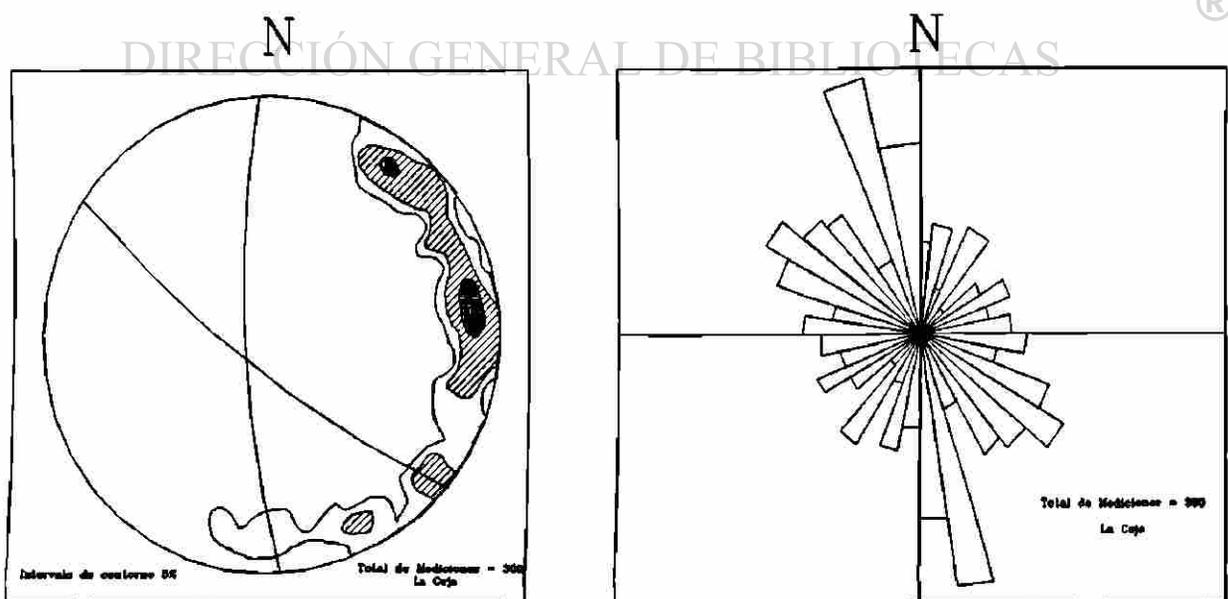


Figura 4.7 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento La Ceja.

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.

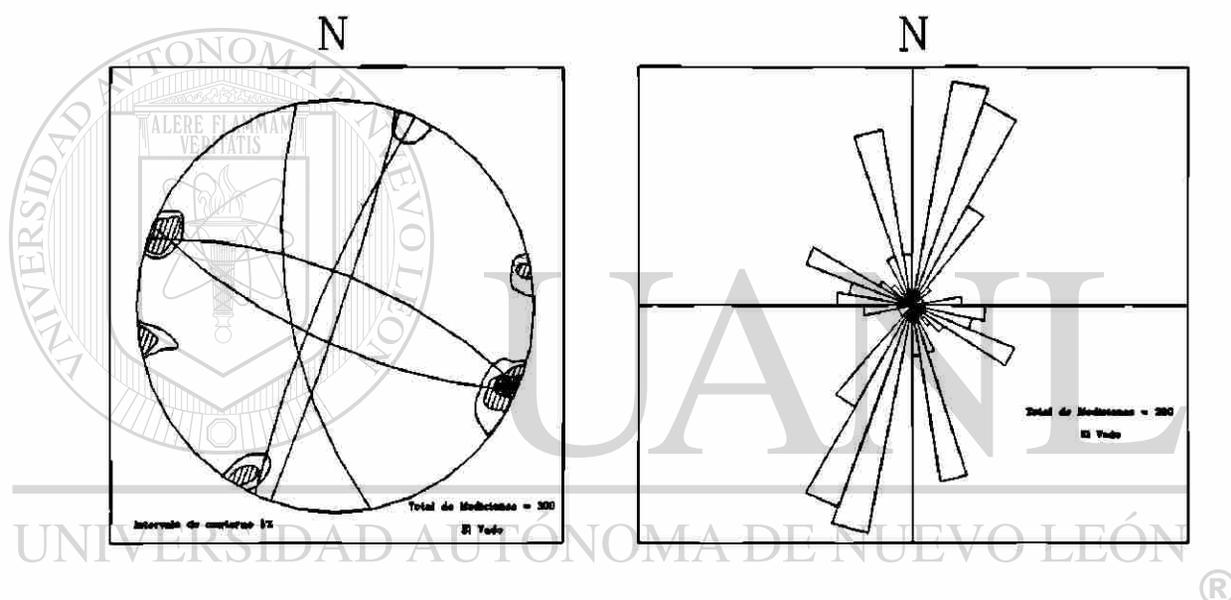


Figura 4.8 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Vado.

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.

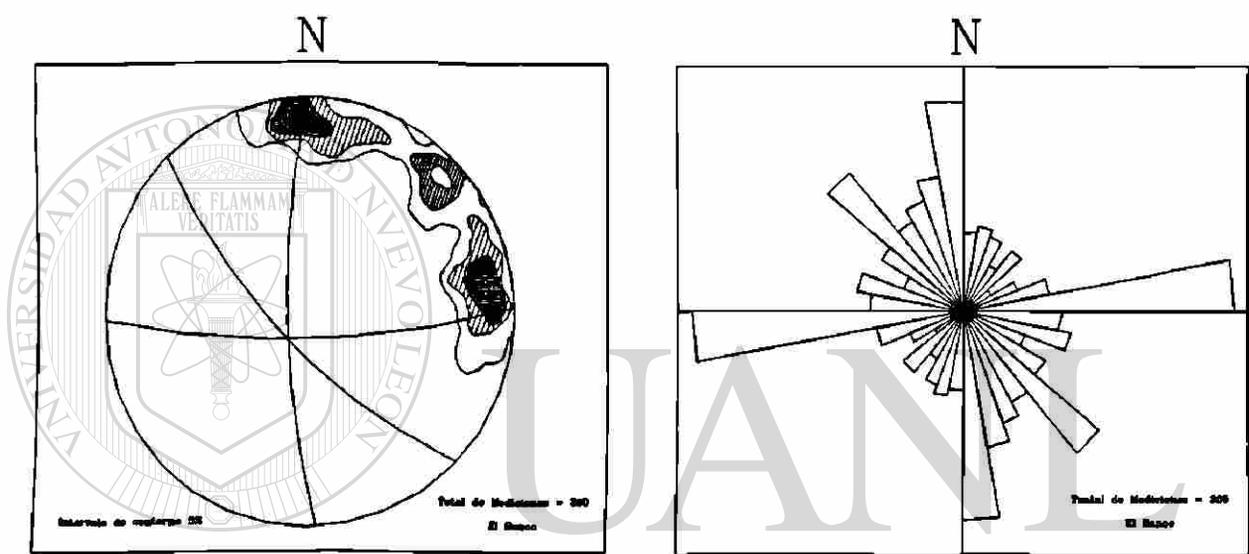


Figura 4.9 Diagrama de polos y rosa de diaclasas para el afloramiento El Banco.®

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 abertura 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.

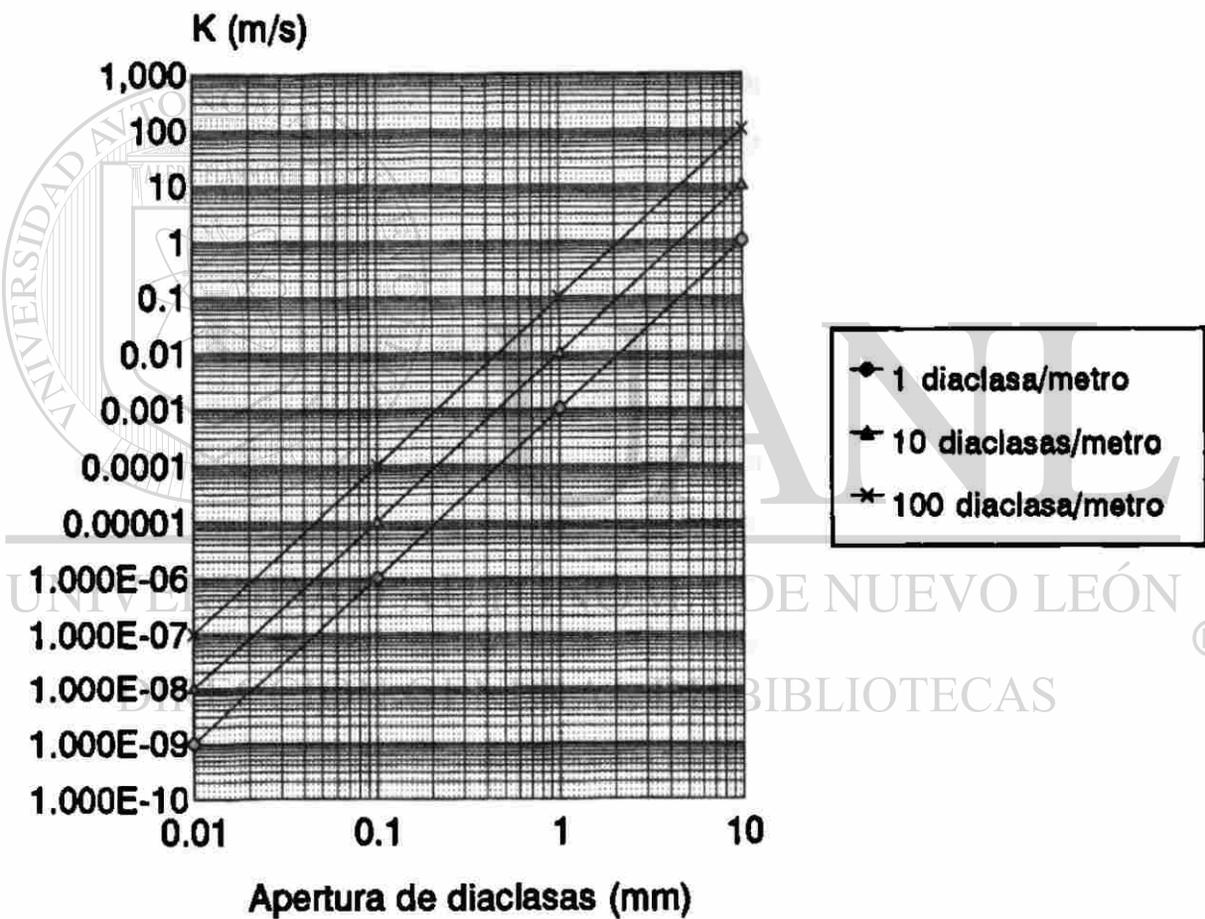


Figura 4.10 Gráfica de apertura de las diaclasas contra Conductividad hidráulica (Tomada de FRANKLIN y DUSSEAULT, 1989).

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 km², 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, Pílon 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 km². Previo a la construcción de la Presa se interpretaron los datos hidrológicos de la Cuenca del periodo 1933 a 1989, obteniéndose que el escurrimiento anual mínimo es de 30.7 Mm³, el

máximo de 2,776.5 Mm³, y el medio de 660 Mm³. El gasto máximo observado es de 7,500 m³/s, la avenida de diseño es de 15,080 m³/s y el período de retomo 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:

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

Siendo K la conductividad hidráulica en m/s, A área de sección en m² 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:

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

donde μ es la viscosidad del fluido en Centipoise y γ es el peso específico en N/m³.

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:

$$T = K h \quad (3)$$

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

$$\eta = V_p/V_t \quad (4)$$

siendo V_p el volumen de huecos o poros y V_t 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 1×10^{-4} a 5×10^{-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 areniscas 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 1×10^{-7} a 1.507×10^{-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:

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

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.

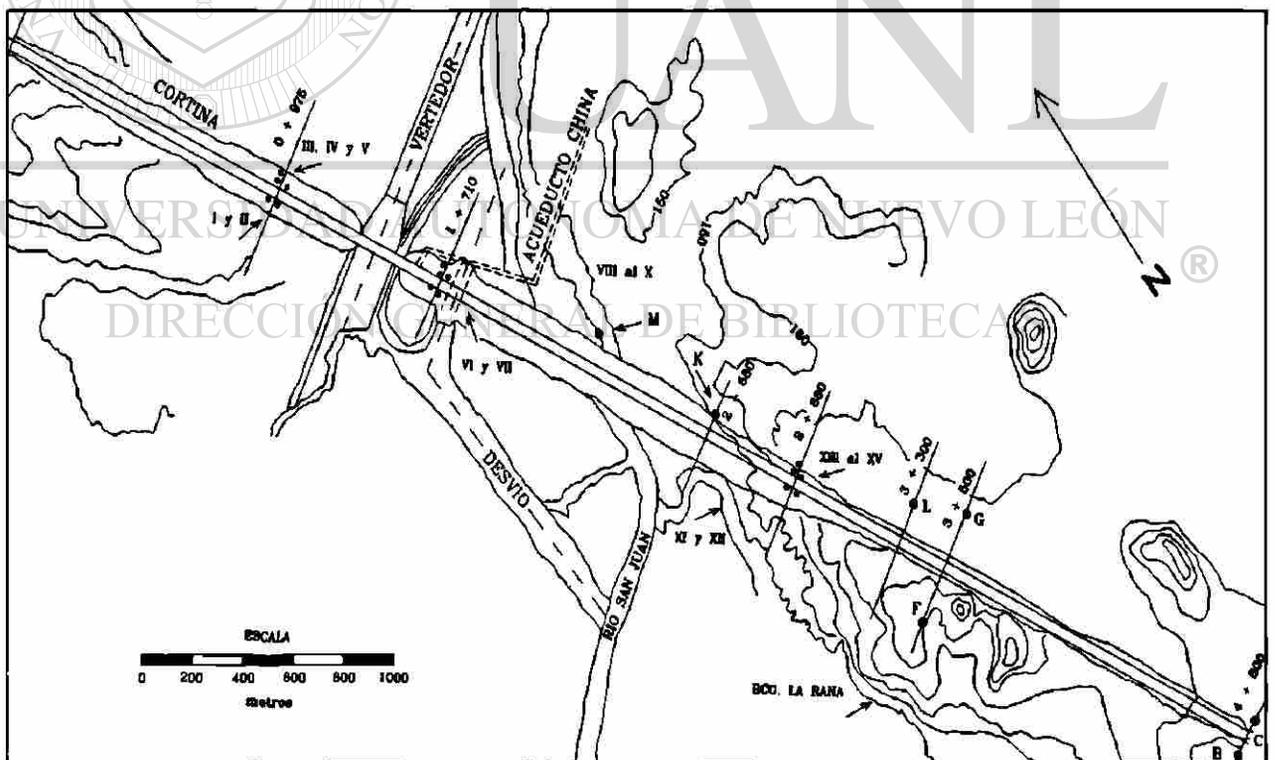


Figura 5.1 Ubicación de los piezómetros a lo largo de la Cortina (las letras mayúsculas y los números romanos indican la ubicación de piezómetros; CNA, 1993).

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 piezómetro 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.

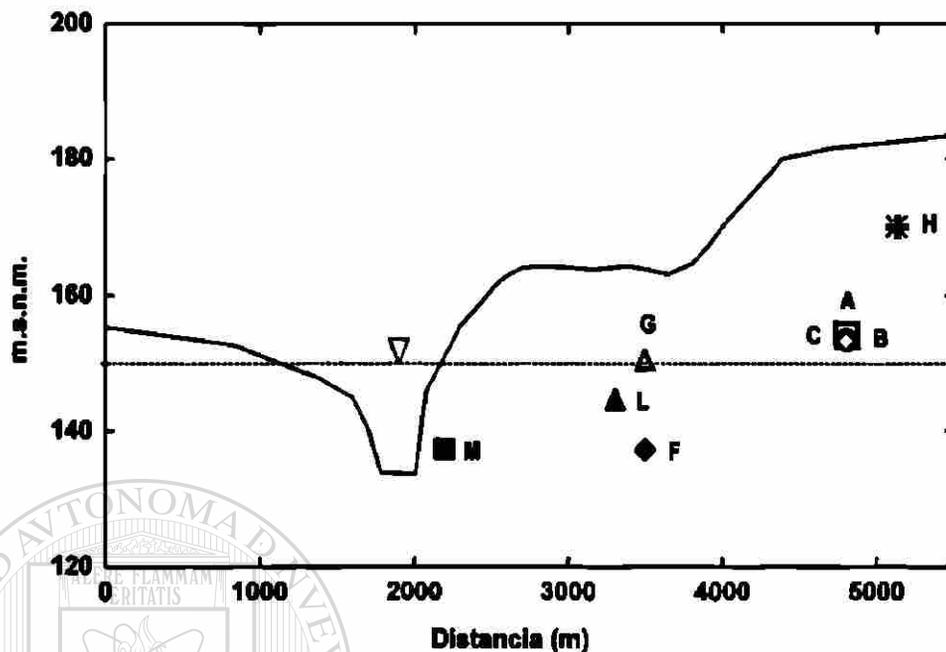


Figura 5.2 Niveles de piezómetros aguas abajo de la Cortina (24 de abril de 1995). La línea continua representa la topografía y la línea punteada el nivel del embalse.

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).

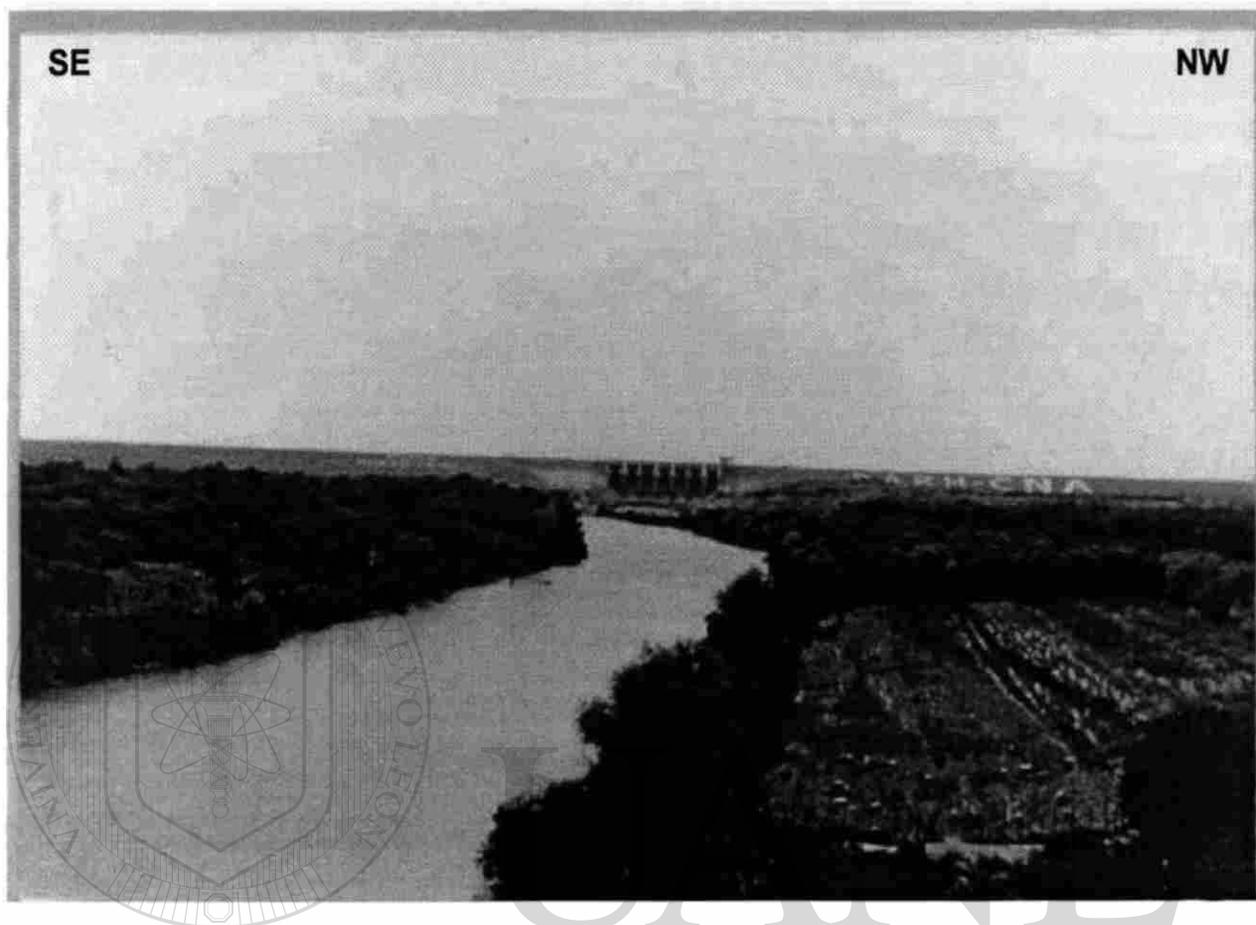


Figura 5.4 Río San Juan aguas abajo de la Cortina en donde confluyen las aguas de las filtraciones.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
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. ($25^{\circ} 36' 01''$ N, $99^{\circ} 16' 20''$ W).
- a) El Vaso de la Presa frente al Dique ($25^{\circ} 43' 18''$ N, $99^{\circ} 17' 29''$ W).
- c) Filtración localizada al pie de la Cortina ($25^{\circ} 42' 10''$ N, $99^{\circ} 16' 21''$ W).
- d) Filtración localizada al pie del Dique, ~200 m al W de la unión de la Cortina con el Dique ($25^{\circ} 43' 42''$ N, $99^{\circ} 17' 28''$ 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).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 físico-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 FÍSICO-QUÍMICO DE LAS AGUAS Y LOS MÉTODOS NORMALIZADOS UTILIZADOS (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

Parámetros	Método
Temperatura	Directo con termómetro de mercurio
Conductividad eléctrica	Directo con conductímetro
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, HCO₃, Cl y SO₄) 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, HCO₃, Cl, y SO₄ 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							
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

^aErr. Reac. (%) = $100 * [\sum (\text{me/l})_{\text{Cat}} - \sum (\text{me/l})_{\text{An}}] / [\sum (\text{me/l})_{\text{Cat}} + \sum (\text{me/l})_{\text{An}}]$
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.

La filtración en el Dique (Figura 5.6d) tiene valores para el Na, Cl y SO₄ de 10 a 50 me/l. Para las otras especies los valores están en la década de 1 a 10 me/l, excepto el potasio, que tiene una valor bajo (< 0.2 me/l).

TABLA 5.7
PARÁMETROS DETERMINADOS EN MUESTRAS DEL VASO Y DE LA FILTRACIÓN DEL DIQUE.

Parámetro	V1	V2	V3	V4	V5	FD1	FD4	FD5
Temperatura (°C)	18.0	24.0	28.4	32.0	21.4	18.0	29.0	25.0
pH	8.7	8.7	8.7	8.3	7.1	8.2	8.4	7.6
C.Elec. (MS/cm)	0.665	0.700	0.695	0.658	0.470	5.26	1.86	4.24
S. Tot. (mg/l)	470	480	484	439	496	5318	1289	3881
S. Dis. (mg/l)	405	428	446	382	481	4980	1175	3711
S. Sus. (mg/l)	65	52	38	57	15	338	114	170
Alc. T. (mg/l)	138.7	133.7	129.8	112.6	69.5	202.6	277.8	125.0
D. Tot. (mg/l)	238.3	255.7	339.9	216.5	205.2	1420.2	433	1721.8
D. Par. (mg/l)	171.7	147.4	138.0	150.2	161.7	875.5	330.0	1521.6
Ca ⁺² (mg/l)	68.8	59.0	55.3	60.2	64.7	350.6	132.2	609.3
Mg ⁺² (mg/l)	16.1	26.3	24.8	16.1	10.6	132.3	25.0	48.6
Na ⁺ (mg/l)	46.8	54.4	51.4	45.8	46.6	977.0	243.0	525.6
K ⁺ (mg/l)	0.5	0.5	0.5	6.18	4.5	0.8	7.15	20.4
CO ₃ ⁻² (mg/l)	5.43	Nd	Nd	Nd	Nd	nd	1.3	Nd
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	158.2	163.1	158.3	137.4	84.7	247.1	336.3	152.5
Cl ⁻ (mg/l)	46.1	53.7	53.4	49.6	34.7	1024.3	367.7	437.1
SO ₄ ⁻² (mg/l)	158.4	162.6	138.8	144.8	124.3	2005.1	268.3	1682.4
Ca ⁺² (me/l)	3.433	2.944	2.759	3.004	3.229	17.495	6.597	30.406
Mg ⁺² (me/l)	1.333	2.164	2.041	1.325	0.872	10.887	2.057	3.998
Na ⁺ (me/l)	2.036	2.366	2.236	1.992	2.027	42.497	10.570	22.862
K ⁺ (me/l)	0.013	0.013	0.013	0.158	0.113	0.020	0.183	0.510
CO ₃ ⁻² (me/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HCO ₃ ⁻ (me/l)	2.593	2.673	2.594	2.252	1.388	4.050	5.512	2.499
Cl ⁻ (me/l)	1.300	1.515	1.506	1.399	0.979	28.892	10.371	12.330
SO ₄ ⁻² (me/l)	3.298	3.385	2.890	3.015	2.588	41.746	5.586	35.035
Err. Reac (%) ^a	-3.92	-0.64	0.35	-1.41	11.51	-2.60	-5.14	7.37

^aVer Tabla 5.6

La conductividad eléctrica del agua de la filtración en el Dique ha variado con el tiempo como se puede apreciar en la Figura 5.7. El descenso en la parte izquierda de la curva se puede explicar si asumimos que tiene lugar la mezcla de aguas del Vaso con las del acuífero superior original, provocando que este último disminuya su concentración de iones a medida que transcurre el tiempo. El aumento que se observa en la parte derecha

hace suponer que acuíferos más profundos se han involucrado en la mezcla, esto al aumentar el nivel de la Presa y por consiguiente la presión hidrostática. La información contenida en la Figura 5.7 será de utilidad cuando se calculen las propiedades de las rocas y del fluido del acuífero original.

El alto contenido de iones de Cloro, Sodio, Calcio y Magnesio en las aguas de las filtraciones, supone que uno de sus componentes de mezcla (el acuífero original) ha diluido capas de evaporitas (RODRÍGUEZ-LOZANO, 1976, LÓPEZ-RAMOS, 1982 y ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986). Por otra parte, se ha encontrado en el campo cierto mineral que rellena algunas de las diaclasas. La identificación de dicho mineral se realizó mediante un estudio de difracción de rayos X en un sistema SIEMENS D-5000. Se aplicó un método de polvos con irradiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ nm}$). La fase fue identificada como yeso, tal como se muestra en la Figura 5.8.

La disolución de evaporitas (yeso), bajo la Cortina y el Dique, pondría en riesgo la estabilidad de la obra hidráulica, pudiendo surgir un colapso; así como el incremento del volumen de agua que se filtra. Por otra parte los acuíferos localizados aguas abajo de la obra tendrán una alta concentración de iones, no pudiéndose utilizar el agua para consumo humano ni animal ni con fines agrícolas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Ya que no se cuenta con análisis de aguas originales en el área de la Cortina, se supone las de la filtración del Dique como las originales, siendo similares a las reportadas por NAVARRO (1996) para acuíferos del área de la Loma Los Pozos. Si se mezclaran las aguas con concentraciones químicas semejantes a las del Dique con las aguas de la Presa se pueden obtener las concentraciones de las aguas de la filtración de la Cortina.

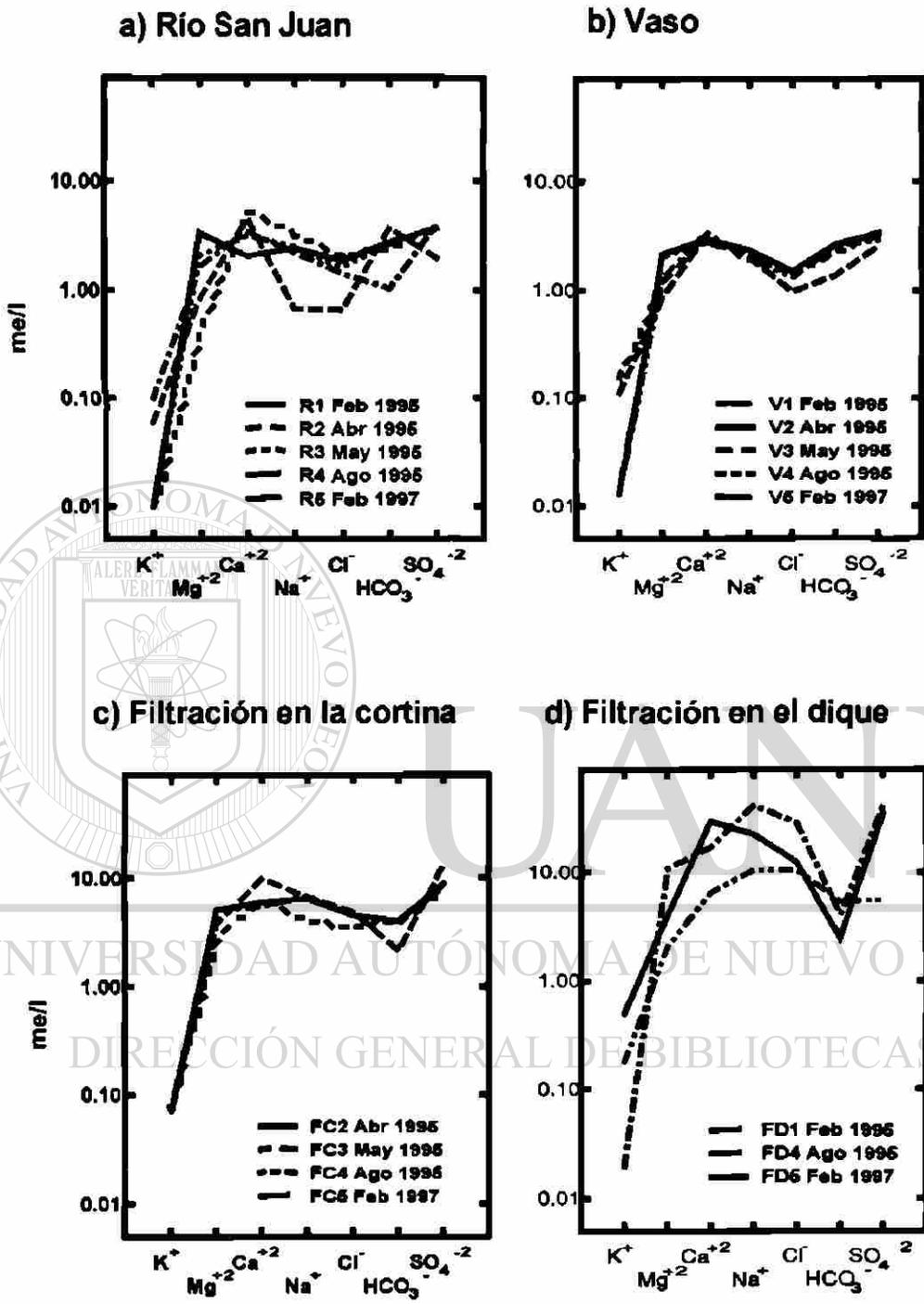


Figura 5.6 Diagramas de Schoeller para las diferentes aguas de: a) El Río San Juan, b) El Vaso, c) La filtración en la Cortina y d) La filtración en el Dique.

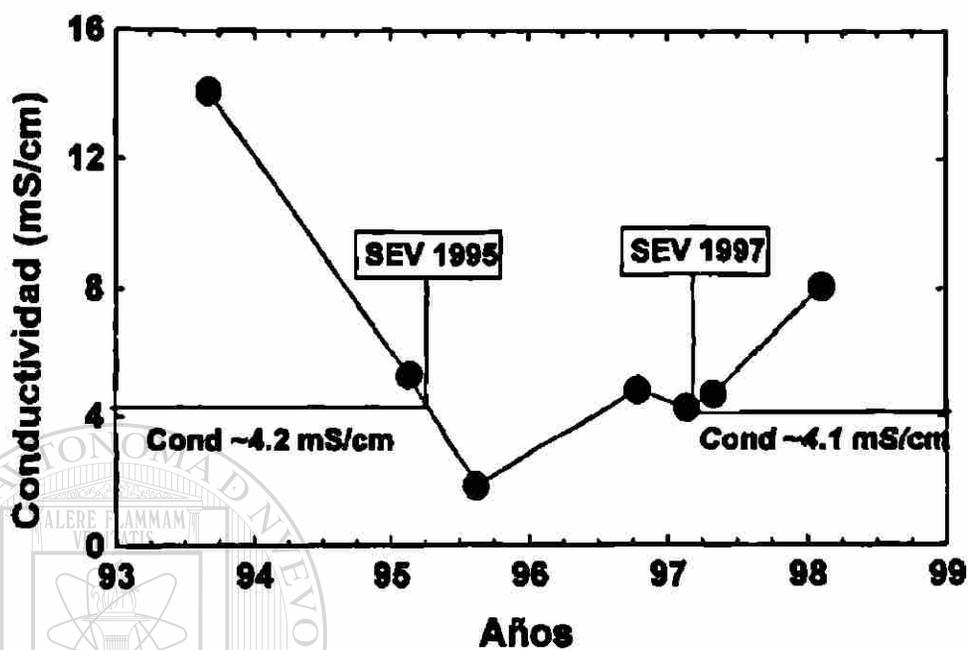


Figura 5.7 Variación de la conductividad eléctrica de las aguas de la filtración del Dique antes y durante la primera etapa de llenado de la Presa.

Z-Theta - Scale UANL-Facultad de Ciencias Químicas, left Goniometer 28-May-1997 19:03

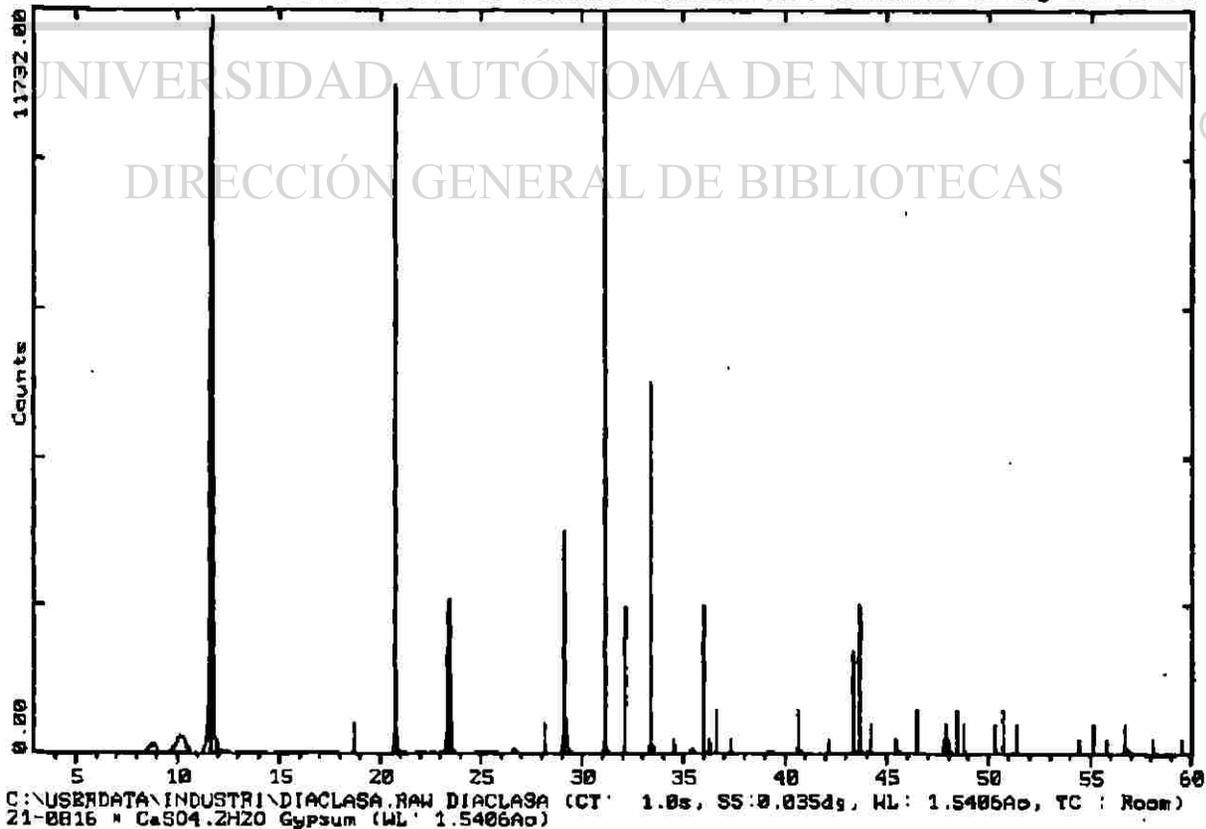


Figura 5.8 Identificación de material que rellena diaclasas por medio de Rayos-X.

CAPÍTULO 6

INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS

6.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de determinar las condiciones geológicas del subsuelo se recurre a la a la prospección geofísica. Los métodos que se utilizan relacionan la medición de algún campo físico con alguna propiedad física. Los campos pueden ser de origen natural o artificial. Algunos de los parámetros de las rocas que tienen importancia en la determinación de parámetros hidrogeológicos son: la resistividad, la resistencia transversal y la conductancia longitudinal.

La resistividad eléctrica o su inverso la conductividad eléctrica pueden ser determinados por métodos geoelectricos, desde la medición de campos eléctricos o magnéticos. Los métodos geoelectricos se clasifican en eléctricos cuando las corrientes asociadas son de frecuencia cero (corriente directa); en cambio, para frecuencias variables reciben el nombre de métodos electromagnéticos. En ambos casos los estudios pueden realizarse a través de sondeos (para estudiar la variación a profundidad) o perfiles (para estudiar la variación lateral).

Las investigaciones que se realizaron en el área de estudio para caracterizar las condiciones geólogo-geofísicas fueron: a) sondeos eléctricos verticales y b) perfiles electromagnéticos.

6.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Se considera resistividad eléctrica (ρ) a la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso por un material determinado (ORELLANA, 1982), sus unidades son ohm-m y se puede calcular en un material mediante la ecuación

$$\rho = R / A , \quad (6)$$

siendo R la resistencia del material en ohm, l su longitud y A la sección de dicho material.

El valor de la resistividad eléctrica de un material geológico depende de su composición mineralógica, su porosidad, de las características químicas del electrolito que se encuentra en dichos poros y de su grado de saturación. Estas variables son de interés hidrogeológico y determinando algunas de ellas podemos calcular las faltantes.

Otro parámetro importante es la resistencia transversal unitaria y para explicarla partimos de que tenemos un medio estratificado en forma de prisma recto de sección cuadrada (Figura 6.1), con el eje perpendicular a la orientación de las capas y de lado igual a la unidad de longitud. Suponemos que el prisma es atravesado por una corriente eléctrica que fluye perpendicular a la estratificación, las diferentes capas se comportaran como conductores en serie, por lo que sus resistencias se sumarán (ORELLANA, 1982). Para la primera capa se puede calcular el producto de su resistividad por el espesor (h) a lo que se le llama resistencia transversal unitaria (T), y con la suma de estos valores de n capas donde se conocen los espesores y resistividades se obtiene la resistencia total T , donde:

$$T = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3 \dots + \rho_n h_n. \quad (7)$$

Las dimensiones de T son ohm - m².

Si consideramos el mismo prisma y suponemos que la corriente fluye paralela a la estratificación, la resistencia del tronco del prisma que corresponde a la i -ésima capa será

$$R = \rho_i / h_i. \quad (8)$$

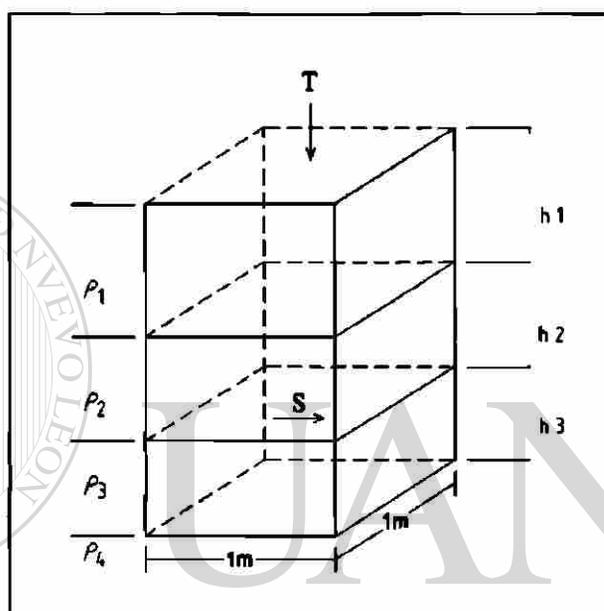
Las resistencias así definidas no pueden sumarse, por estar en paralelo; por lo que conviene pasar a sus inversas, las conductancias. Llamando S_i a la conductancia de la i -ésima capa tendremos:

$$S_i = h_i / \rho_i \quad (9)$$

A esto se le llama **conductancia longitudinal unitaria** y el conjunto de las n primeras capas del corte tendrá una conductancia total:

$$S = h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2 + h_3 / \rho_3 \dots + h_n / \rho_n \quad (10)$$

Las unidades de S son siemens.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 Figura 6.1 Medio estratificado utilizado para la definición de la resistencia transversal unitaria (Modificado de ORELLANA, 1982).
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.3 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's)

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) están comprendidos en los métodos geoelectrónicos de campo artificial. Fueron utilizados en este trabajo con el fin de caracterizar, de manera general, las rocas del área de la Presa y delimitar zonas potencialmente permeables. Los SEV's consisten de una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el dispositivo mostrado en la Figura 6.2 (DAVIS y DE WEIST, 1971). La separación creciente entre los electrodos de emisión (A y B) y los de recepción (M y N), permite investigar a mayor profundidad.

Cuando tenemos un medio heterogéneo como el de la Fig. 6.1 en donde se realiza prospección geoelectrica mediante algún dispositivo (como el de la Fig. 6.2), los valores de resistividad que obtenemos para cada separación de los electrodos de corriente serán, no la resistividad específica de cada capa, sino el efecto conjunto de ellas, llamándosele a este valor resistividad aparente. El valor de resistividad aparente puede calcularse desde

$$\rho = C \Delta V / I, \quad (11)$$

donde C es el factor geométrico que depende de la posición de los electrodos, ΔV es la diferencia de potencial medida e I es la corriente eléctrica inyectada.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan mediante una curva, en función de la distancia entre electrodos. Dicha curva dependerá de la disposición geométrica de los electrodos de corriente y los de potencial. Entre los dispositivos más utilizados se encuentran: el dispositivo Wenner y el dispositivo Schlumberger.

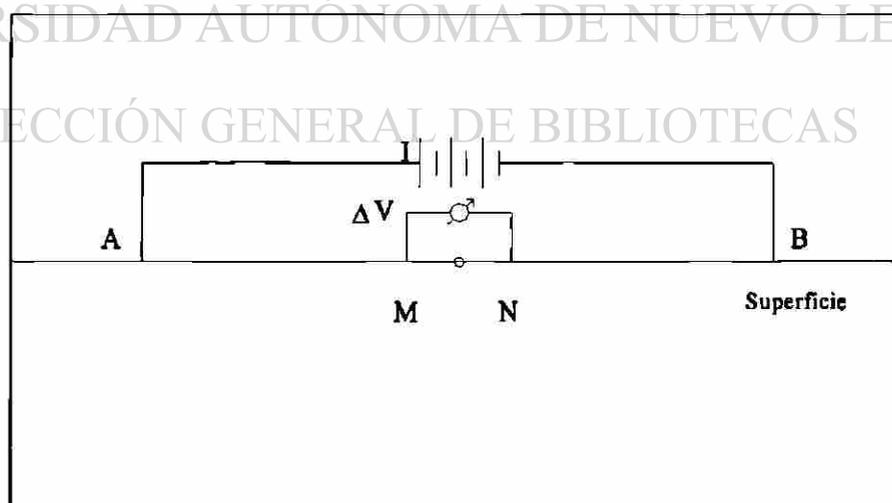


Figura 6.2 Arreglo Schlumberger empleado para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales (Modificado de ORELLANA, 1982).

La curva obtenida recibe el nombre de curva de resistividad aparente y para el arreglo Schlumberger se grafica $AB/2$ contra ρ_a en escala logarítmica. Dicha curva debe ser interpretada para obtener los valores de la resistividad eléctrica y espesor de cada parte de la sección geológica.

En el área del Dique de la Presa se realizaron tres campañas de SEV's en las siguientes fechas: octubre de 1992, abril de 1995 y marzo de 1997. En el área de la Cortina se realizaron sólo en abril de 1995, ya que después de esa fecha no fue posible tener acceso al área. La localización de los SEV's se indica en los ANEXOS A y B. En el ANEXO A se presenta la Tabla 1 con la localización de los sondeos en el Dique y en la Tabla 2, para la Cortina. En el ANEXO B se presenta un plano donde aparece la ubicación de los sondeos.

Para la realización de los SEV's se utilizó un equipo de resistividad marca SCINTREX, compuesto por:

- Transmisor modelo TSQ-2E con 750 W de potencia. El transmisor es alimentado por un motor de gasolina que suministra 115 V de Corriente Alterna.
- Receptor modelo RDC-10 con una rango de lectura de 30 microvolts a 30 volts.
- Equipo complementario: dos carretes portacables, marros, electrodos de acero, cinta métrica, brújula y botes para solución salina.

La configuración utilizada para los SEV's fue el dispositivo Schlumberger con aberturas $AB/2$ de 1.5 hasta 220 m. Los puntos de los sondeos se distribuyeron a distancias de 300 a 1000 m. Los sondeos que se realizaron en 1992 se ubican cerca del Dique en el área de la Presa actual; mientras que para los de 1995 y 1997 se desplazaron los puntos de sondeo al otro lado del Dique, una distancia que no excede los 50 metros, y se realizaron paralelos al rumbo de las capas.

En el ANEXO A se encuentran los valores de la resistividad aparente obtenidos en las diferentes campañas a lo largo del Dique, para 1992 se presentan en la Tabla 3; en la Tabla 4, para 1995 y en la Tabla 5, para 1997. En la Tabla 6 se presentan los datos de los sondeos realizados a lo largo de la Cortina para el año de 1995. Con los valores de la resistividad aparente obtenidos de los sondeos realizados en el área del Dique se construyeron gráficas de resistividad aparente, las cuales se encuentran también en el ANEXO A.

Con los valores de resistividad aparente presentados en el ANEXO A se construyeron secciones de resistividad aparente del área del Dique para los años 1992, 1995 y 1997 (Figura 6.3). La distancia entre los sondeos varía de 300 a 1000 metros y las secciones se presentan esquematizadas dando una exageración vertical y horizontal aproximadamente de 20 veces.

En la sección para el año de 1992, se observa que existen dos zonas bien diferenciadas, la de la parte Oeste en donde los valores de resistividad aparente son bajos (6 – 20 ohm-m) y la parte Este con valores de 20 a 40 ohm-m. En la dirección Este se pueden distinguir que en la parte superior los valores de resistividad son bajos, aumentando hacia la parte intermedia de la sección y disminuyendo hacia la parte profunda.

En el año de 1995 los valores de resistividad disminuyeron considerablemente en la parte inferior Este de corte, tendiendo a ser homogéneas en la parte inferior de toda la sección, lo que pudiera estar relacionado con el ascenso del nivel freático al aumentar el nivel del embalse. Hacia la parte superficial existen todavía algunos lugares con valores altos de resistividad. No se observa cambio significativo entre las secciones de 1995 y 1997, sólo en la parte superficial, lo que pudiera estar relacionado con los trabajos de remoción de la parte superficial del terreno por trabajos de ingeniería civil a lo largo de la carretera, poco tiempo antes de la última campaña de estudios.

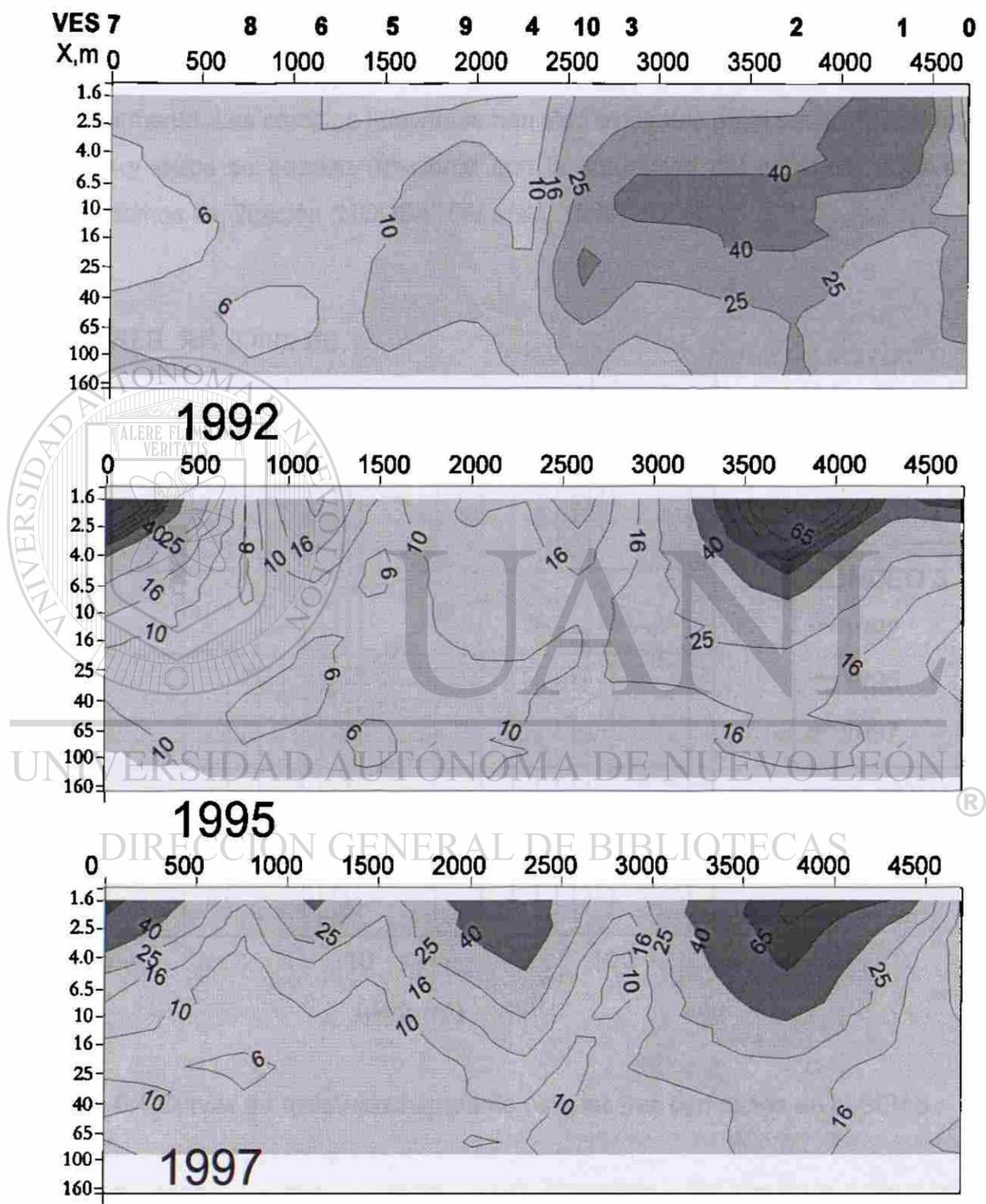


Figura 6.3 Secciones de resistividad aparente del área del Dique para los años 1992, 1995 y 1997.

En la Figura 6.4 se presentan las curvas de resistividad aparente para las tres campañas en el punto del sondeo 3. Entre ellas, se observan cambios en la parte izquierda debido al desplazamiento del centro de los sondeos, como se explicó anteriormente. Los cambios relevantes han sido evidentes en la parte intermedia de las curvas y estos se pueden relacionar con la saturación del subsuelo y los posibles mecanismos de filtración (MOUSATOV *et al.*, 1999).

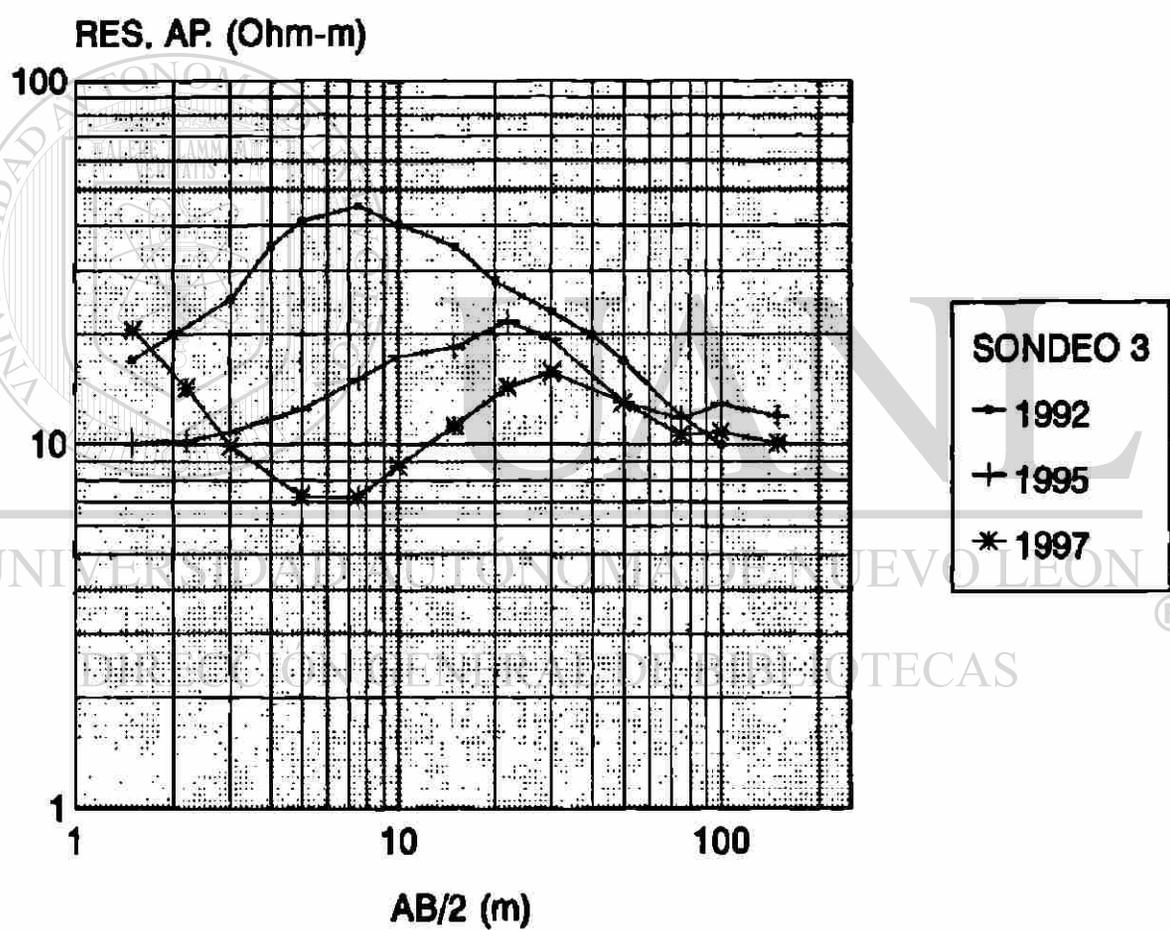


Figura 6.4 Curvas de resistividad aparente para las tres campañas en el SEV 3 .

En 1992 se realizó un estudio por parte de Universidad Estatal de Moscú (UEM) y de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en el área de la Presa El Cuchillo con el fin de caracterizar de manera general las rocas del área y delimitar zonas potencialmente permeables (UANL-UEM, 1993b). En dicho año se efectuaron un

total de 110 SEV's con el dispositivo Schlumberger, con aberturas de AB/2 desde 1.4 hasta 150 – 200 m. Los datos obtenidos fueron sometidos a tratamiento estadístico con la finalidad de elaborar los modelos geoelectricos para interpretación cuantitativa, determinar las características generales del macizo rocoso y las zonas potenciales en cuanto a permeabilidad hidráulica del área de la Presa. Los resultados del análisis estadístico muestran que el promedio de las curvas corresponde al modelo de un medio de cuatro capas tipo QH con las resistividades 30-20-14-16 ohm-m, y espesores $h = 1.5 - 3 - 30$ m. Los valores del factor estándar (para distribución logarítmica) disminuyen de 2.8 en las aberturas cortas hasta 1.3 en las mayores. La disminución de la dispersión con la profundidad tiene correspondencia con la situación hidrogeológica y se relaciona con la saturación de las rocas de la Formación Mount Selman por aguas subterráneas salobres (MOUSATOV *et al.*, 1996).

Para la interpretación de los datos de los SEV's se empleó el programa IPI desarrollado en la Universidad Estatal de Moscú. Suponiendo un semiespacio estratificado (1 D) para el que se determinaron los valores de resistividad y espesor de cada uno de los estratos. EL programa permite resolver el problema inverso por corrección manual o automática de los parámetros de las capas y se puede fijar información obtenida *a priori* de parámetros conocidos. Este programa puede trabajar con un grupo de curvas para diferentes SEV en un mismo archivo obteniéndose una sección geoelectrica (PRADO-GÓMEZ, 1997).

Los datos de las resistividades y espesores de capas obtenidas al interpretar, para cada sondeo y para las tres diferentes campañas, se presentan en el capítulo 7 por requerirse para realizar cálculos de propiedades de las rocas; sin embargo, en la Figura 6.5 se puede ver la sección geoelectrica que corresponde a los SEV's a lo largo del Dique para las tres campañas.

Los resultados de las interpretaciones para los SEV's efectuados en 1992 (Figura 6.5a) reflejan de forma general la estructura geológica principal con buzamiento de las capas intercaladas de areniscas y lutitas de 10° hacia el Este (tomando en cuenta exageración de escalas). Se puede dividir el corte geoelectrico en tres unidades principales. En la parte superior del corte, las resistividades de las capas y sus espesores varían a lo largo del perfil con límites de 10 a 50 ohm-m y de 1 a 3 m, respectivamente. La parte intermedia corresponde a la profundidad de 1-3 a 40 m y se observan dos áreas: una al Oeste entre los sondeos 8 y 4, con resistividades de 3 –15 ohm-m; la otra, al Este entre los puntos 10 a 0 con resistividades de 15 a 60 ohm-m. La parte inferior del corte, a profundidades mayores de 40 m, se caracteriza por resistividades más homogéneas con límites de 7 a 15 ohm-m, que corresponde con las rocas que están debajo del nivel de saturación de las aguas subterráneas salobres.

Debido al desplazamiento del centro de los sondeos para las campañas de 1995 y 1997, las partes izquierdas de las curvas de resistividad aparente tienen cambios evidentes con respecto a las de 1992, sin embargo, esta diferencia se relaciona con profundidades de 1-3 m y corresponde a la parte superior del corte.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El extremo Oeste del corte geoelectrico en el Dique continúa con valores bajos al transcurrir el tiempo, mientras que para el Este los valores de resistividad bajaron significativamente en la parte intermedia del corte, siendo del orden de 7 a 30 ohm-m. La parte baja del corte tiende a homogenizarse con valores de 30 – 40 ohm-m.

El corte geoelectrico para 1997 (Figura 6.5c) muestra una disminución considerable en la resistividad de las rocas a profundidades > de 10 m en la parte W y esto se ha generalizado hasta el sondeo 3, mostrando el resto de los SEV valores estables de resistividad.

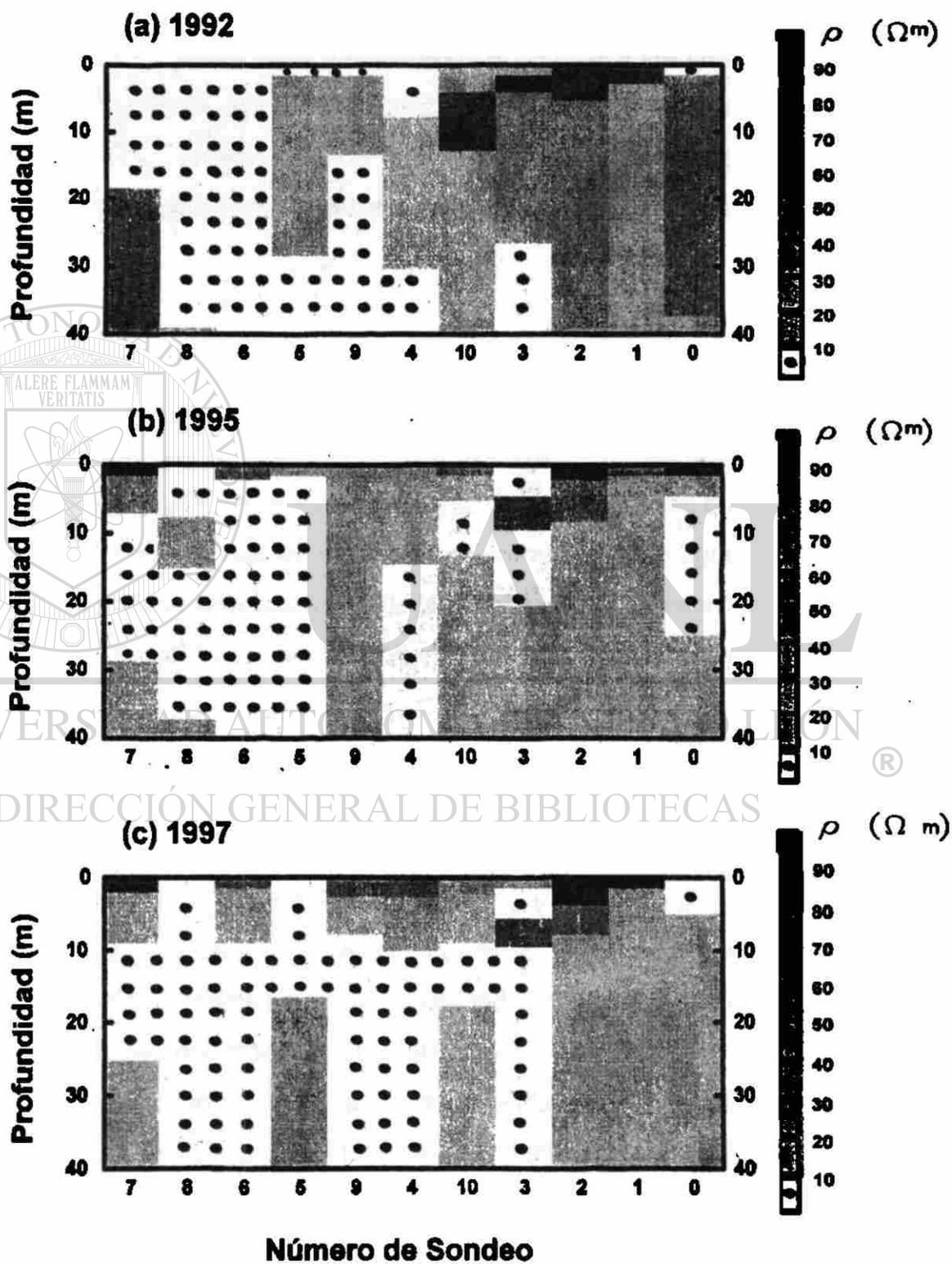


Figura 6.5 Secciones geoelectricas a lo largo del Dique para el año a) 1992, b) 1995 y c) 1997.

De los valores de resistividad de las rocas y su cambio en el tiempo se pueden deducir los mecanismos probables de filtración que tienen lugar en el Dique. Para la parte Oeste (sondeos 7 y 8), se propone que el mecanismo está relacionado con filtraciones laterales provocadas por la diferencia de nivel entre las aguas de la Presa y los niveles topográficos aguas abajo del Dique. Este mecanismo es favorecido por la existencia de zonas de fallas y las diaclasas. Prueba de lo anterior es la aparición de un de un manantial intermitente de aguas con contenido de sales (0.5 g/l) semejante al de la Presa.

En la parte Este del Dique (sondeos 10 – 0) se requiere de un mecanismo más complicado; en este caso se supone que las aguas salobres subterráneas de la región ascienden aguas abajo debido a la presión hidrostática de las aguas de la Presa. La penetración de las aguas es favorecida por las fallas y diaclasas que se encuentran en la base de la Presa. Prueba de lo anterior es el manantial de aguas salobres (3.5 g/l) frente al SEV 0. Como consecuencias de las filtraciones se pueden tener, además de la pérdida del líquido del Vaso, la inundación de terrenos adyacentes del nivel de la Presa y su salinización.

Con el fin de documentar los resultados de los sondeos realizados en 1995 a lo largo de la Cortina, se presenta su interpretación, obteniéndose la sección geoelectrica que se muestra en la Figura 6.6. Los sondeos 1, 2 y 3 se efectuaron en la parte E de la Cortina aguas abajo y los 2 restantes en la parte W. Se observa que los sondeos 1 al 3 muestran valores muy semejantes de resistividad. En la parte superior se tienen valores altos de resistividad del orden de 70 – 90 ohm-m; en la parte intermedia (5 a 20 m), valores de 5 – 20 ohm-m; y en la parte profunda valores de 20 - 50 ohm-m. Los sondeos 4 y 5 se caracterizan por tener valores altos de resistividad del orden de 30 a 120 ohm-m. Los valores de resistividad de la parte intermedia de los sondeos 1-3 pudieran relacionarse con una zona de saturación, prueba de ello es la filtración que se

encuentra frente al sondeo 2. Los valores de resistividad altos en los sondeos 4 y 5 muestran que las rocas se encuentran no saturadas.

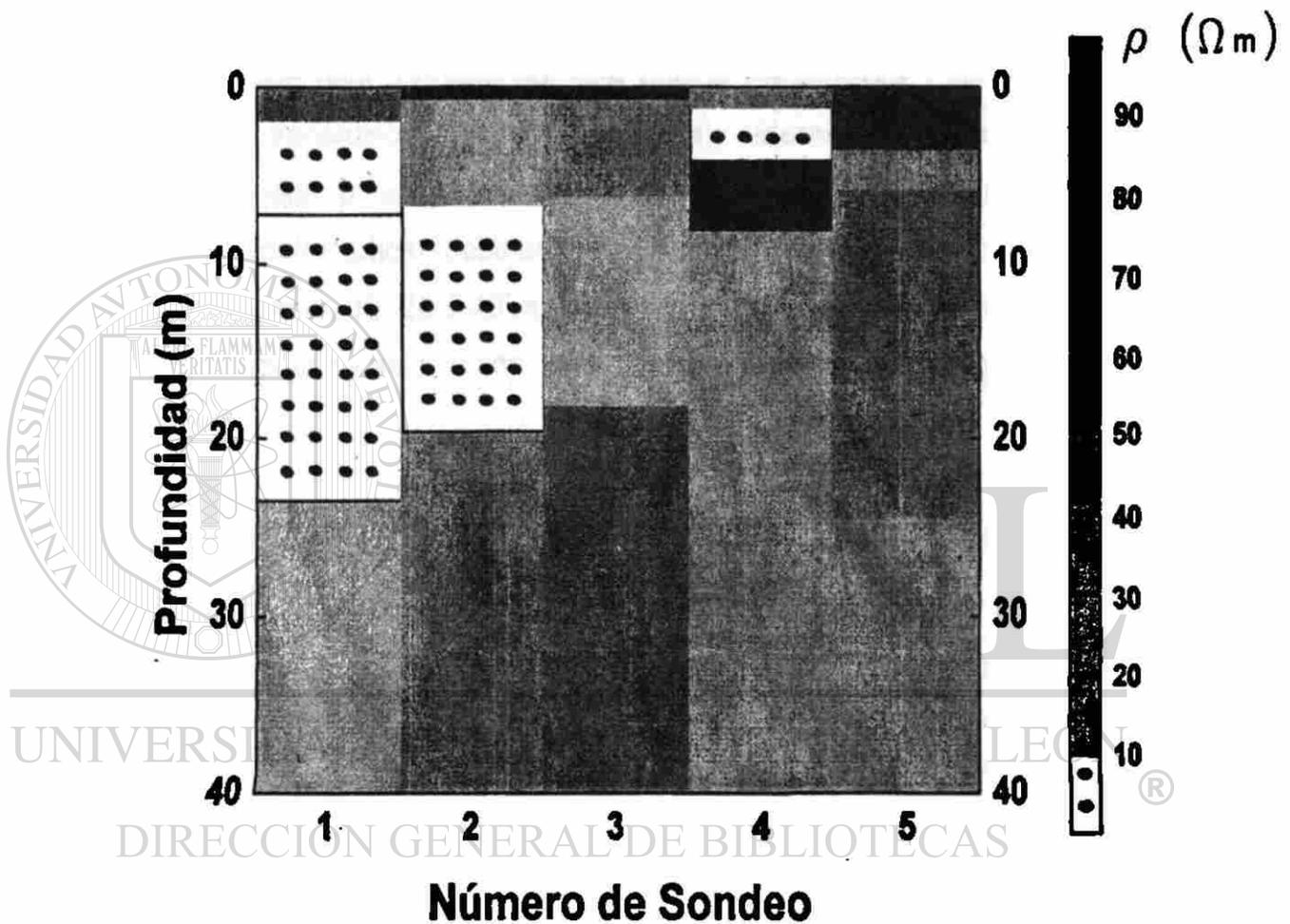


Figura 6.6 Sección geoelectrica a lo largo de la Cortina para el año 1995.

6.4 PERFILES ELECTROMAGNÉTICOS

Existe una gran diversidad de arreglos y configuraciones en los métodos electromagnéticos, los cuales dependen de varios factores como: naturaleza del campo medido, frecuencia y tipo de receptor utilizado, entre otros.

En el presente trabajo se realizaron perfiles electromagnéticos con el fin de determinar los cambios laterales en las propiedades de las rocas, específicamente

conductividad; lo que puede estar asociado, según reporta McNEILL (1980), con zonas de fractura. Por la anterior razón se ha empleado en el territorio adyacente al Dique, aguas abajo. Cabe aclarar que también se pueden realizar sondeos electromagnéticos para determinar los cambios en las propiedades verticalmente.

El equipo utilizado para la prospección electromagnética es el EM-34-3 de Geonics, Ltd., que está formado por una bobina transmisora y otra receptora y dos consolas (una transmisora, y otra receptora), además de cables de diferentes longitudes. El equipo puede operar en dos modos: dipolo horizontal (bobinas verticales coplanares) y dipolo vertical (bobinas horizontales coplanares). La separación entre las bobinas puede ser de 10, 20 ó 40 m y esta separación tiene una relación directa con la profundidad efectiva de exploración, tal y como se muestra en la Tabla 6.1.

TABLA 6.1
PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN DEL EQUIPO EM-34-3 PARA VARIAS
SEPARACIONES ENTRE BOBINAS (TOMADA DE MCNEILL, 1980).

SEPARACIÓN ENTRE BOBINAS EN METROS	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN EN METROS (DIPOLO HORIZONTAL)	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN EN METROS (DIPOLO VERTICAL)
10	7.5	15
20	15	30
40	30	60

Basándonos en la Figura 6.7, el equipo funciona de la manera siguiente: la bobina transmisora a la que se le suministra corriente alterna de frecuencia conocida, genera un campo magnético primario H_p que también varía en el tiempo e induce pequeñas corrientes en la tierra; la bobina receptora se localiza a una distancia y a ella llega un campo magnético total que incluye al campo primario y el inducido o secundario H_s . En general el campo magnético secundario depende de la separación

entre las bobinas (s en metros), la frecuencia de operación (f en Hertz) y la conductividad aparente del subsuelo (σ_a en siemens/m).

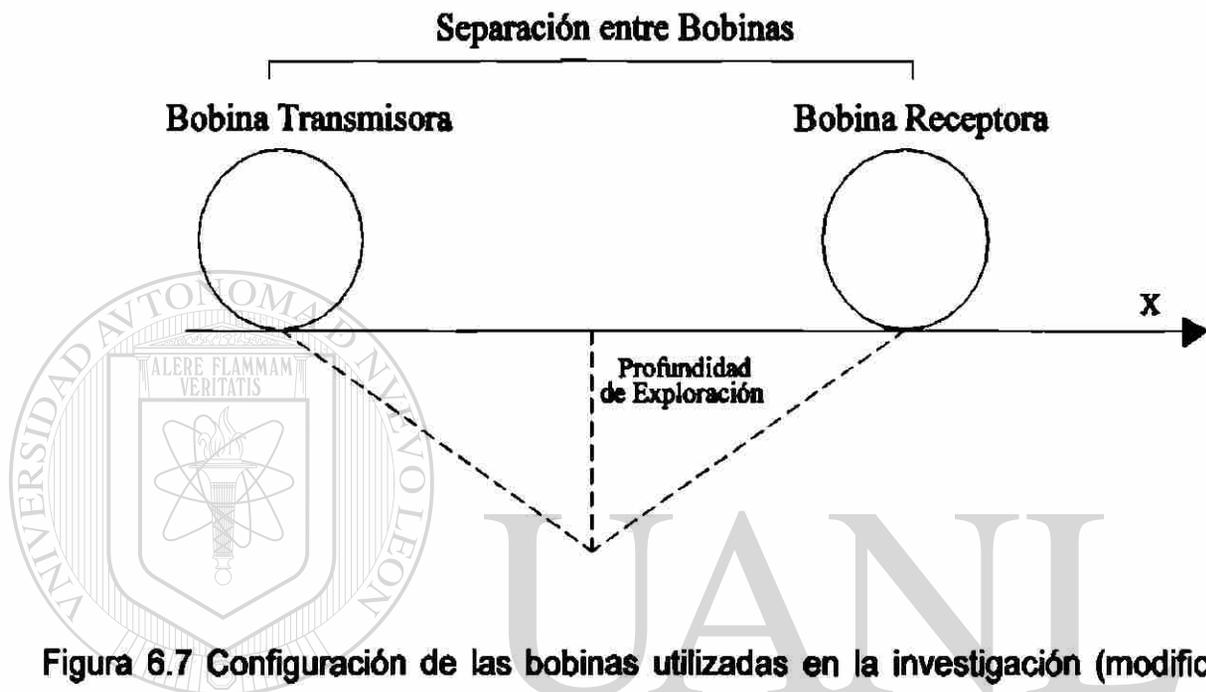


Figura 6.7 Configuración de las bobinas utilizadas en la investigación (modificada de MÉNDEZ-DELGADO, 1999).

El equipo opera a bajas frecuencias en lo que es llamado el límite resistivo o pequeños números de inducción. El valor de conductividad aparente tiene una relación con el cociente del campo magnético secundario al primario (McNEILL, 1980; OGILVY *et al.*, 1991), y está dado por

$$\sigma_a = (i4/\omega\mu s^2) * (H_s/H_p) , \tag{12}$$

donde $\omega = 2\pi f$, μ es la permeabilidad magnética e $i = \sqrt{-1}$.

Se realizaron dos perfiles paralelos al Dique en marzo de 1997 (Figura 6.8). El primero es paralelo al Dique y tiene su inicio en su extremo Oeste a 10 m aguas abajo y con una longitud de 5340 m (perfil 0). El segundo a 154 m al Norte, paralelo al primero y con una longitud de 4680 m (perfil 1). La separación entre las bobinas fue de 20 m.

Las bobinas se utilizaron en la modalidad de dipolo horizontal, por lo que se espera tener una profundidad de exploración de 15 m; la justificación de utilizar tal modalidad radica en que se puede efectuar una interpretación más simple y directa que con el otro modo, puesto que las anomalías son más simples (MÉNDEZ-DELGADO, 1997; MÉNDEZ-DELGADO *et al.*, 1999).

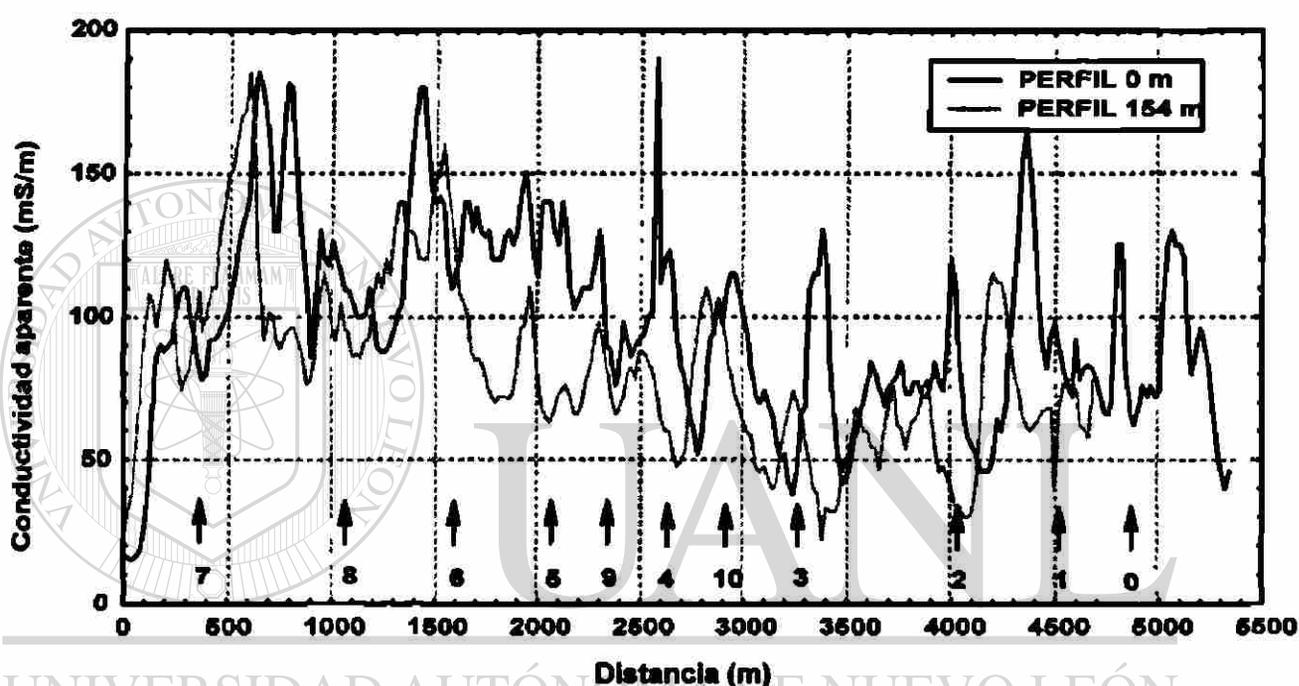
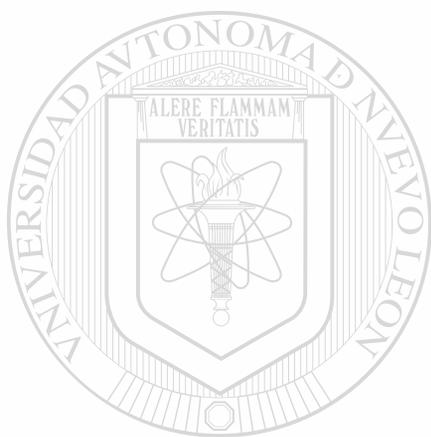


Figura 6.8 Variación de conductividad aparente obtenida con el modo de bobinas verticales coplanares a lo largo del Dique (los números en la parte de abajo corresponden a los SEV's).

Existe similitud entre las anomalías de ambos perfiles. Con el fin de tener un parámetro que nos reflejara dicha similitud, se calculó el coeficiente de correlación, el cual fue de 0.60. Si efectuamos una correlación cruzada, es decir, tomamos como fijo el perfil cero y desplazamos hacia el Este los datos del perfil uno, se obtienen coeficientes mayores, siendo el máximo de 0.77 cuando el desplazamiento es de 80 m.

El desplazamiento de los datos de los perfiles, uno con respecto a otro, para obtener valores más altos de correlación, se puede relacionar con la situación geológica del lugar. Podemos suponer que las anomalías de conductividad aparente tienen relación con el rumbo de las capas de lutitas y areniscas de la Fm. Mount Selman, así como con uno de sus rumbos de diaclasas (ver apartado 4.4). El valor promedio de conductividad aparente para los primeros 230 datos del perfil a 10 m aguas abajo del dique es de 100 mS/m, mientras que para el perfil a 154 m aguas abajo es de 82.67 mS/m. Esta disminución en la conductividad se puede relacionar con el descenso del nivel freático al alejarnos de la zona de recarga (el Vaso).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 7 RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN DE LOS ESTUDIOS

7.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de la integración de los diferentes métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos que contribuyen a la determinación de los mecanismos de filtración que tienen lugar en el área de la Cortina y del Dique. Para lograr la determinación del mecanismo de filtración, además de los estudios realizados en el presente trabajo, se incluye información relevante de otros trabajos efectuados con anterioridad en el área de la Presa El Cuchillo.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación pueden servir como base para la realización de modelado matemático a efectuarse en una etapa posterior de investigación de las condiciones hidrogeológicas. Por otro lado, la información generada se puede utilizar como parte del control (monitoreo) de la obra hidráulica y su relación con el medio geológico.

7.2 ANÁLISIS DE DATOS GEOQUÍMICOS

Como se mencionó en el apartado 5.6, referente a los análisis geoquímicos de las aguas de las fuentes del área de estudio, el proceso de mezcla de aguas podría ser la explicación de las diferentes concentraciones químicas de las aguas en las filtraciones frente a la Cortina y el Dique.

La Figura 7.1 muestra la gráfica de Schoeller obtenida resumiendo los resultados de la figura 5.6. La concentración de iones de las aguas de la filtración de la Cortina, muestra que allí tiene lugar la mezcla de las aguas del Vaso con las aguas del acuífero original. Se observa que la concentración de la mayoría de los iones analizados para el caso de la filtración de la Cortina, se encuentra entre las del Vaso y la filtración del Dique.

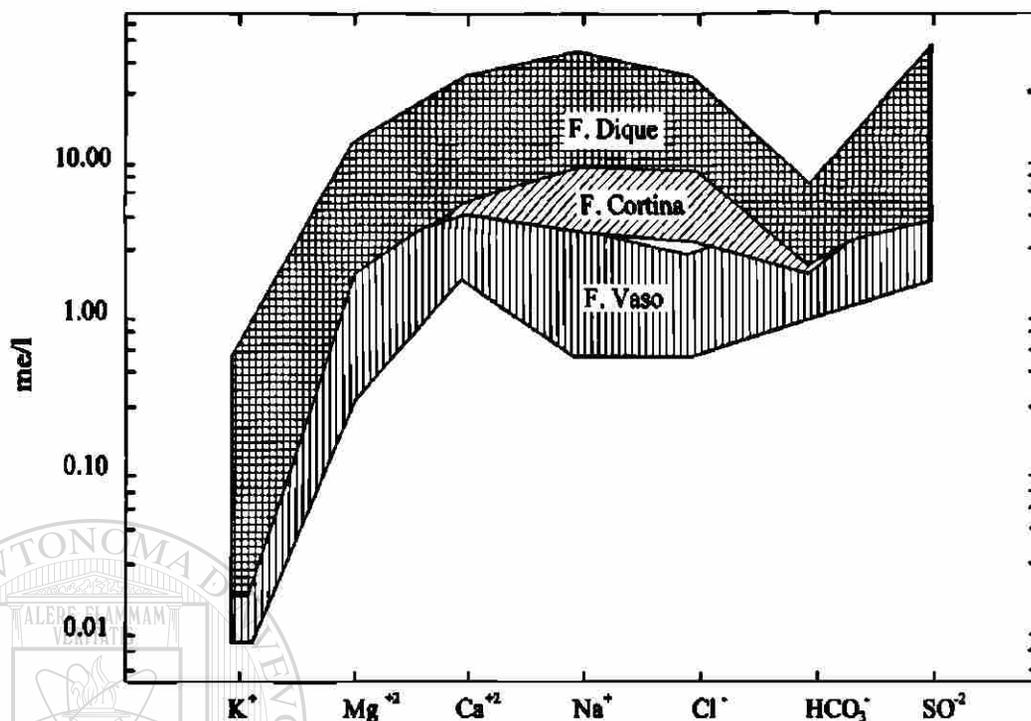


Figura 7.1 Gráfica de Schoeller para las diferentes aguas del área de estudio.

En vista de que no se cuenta con muestras y, por consiguiente, análisis de aguas del acuífero original, se suponen las aguas de la filtración frente al Dique como las originales. Esto es soportado por los estudios realizados por NAVARRO (1996) en la loma Los Pozos, donde se localizan aguas con concentraciones de iones muy semejantes a la filtración del Dique.

Con el fin de determinar las proporciones de los componentes de la mezcla se realizaron algunos cálculos basándonos en la ecuación propuesta por MAZOR (1991)

$$Ax + B(1 - x) = C, \quad (13)$$

donde A , B y C son las concentraciones del ion seleccionado en cada tipo de agua que participa en la mezcla, calculándose para todos los iones analizados; x es la proporción de la componente A y $(1-x)$, la de B .

Para el presente trabajo se seleccionaron como aguas que se mezclan, la del Vaso (V2) y la del Dique (FD1); como producto, el agua de la filtración de la Cortina

(FC2). Cabe aclarar que se seleccionó la FD1 por ser de las primeras en aparecer (muestreo 1) y la V2 y FC2 por tener registro de ambas (muestreo dos), existiendo entre las muestras uno y dos un periodo de dos meses. Los datos utilizados para el cálculo de las proporciones se presentan en la Tabla 7.1, así como las proporciones calculadas de V2 y FD1.

Se concluye que para lograr las concentraciones químicas de las aguas de la filtración de la Cortina, se requiere que una porción de 0.8232 ± 0.0939 del agua del Vaso se mezcle con 0.1768 ± 0.0939 de agua del acuífero original, es decir, su relación es 4.66:1 respectivamente.

TABLA 7.1
DATOS PARA EL CÁLCULO DE PROPORCIÓN DE MEZCLA Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Ion	V2	FD1	FC2	Proporción de V2	Proporción de FD1
Ca ⁺² (mg/l)	59.0	350.6	118.9	0.795	0.205
Mg ⁺² (mg/l)	26.3	132.3	61.1	0.672	0.328
Na ⁺ (mg/l)	54.4	977.0	147.5	0.899	0.101
K ⁺ (mg/l)	0.5	0.8	2.8	*	*
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	163.1	247.1	254.4	*	*
Cl ⁻ (mg/l)	53.7	1024.3	159.9	0.891	0.109
SO ₄ ⁻² (mg/l)	162.6	2005.1	422.8	0.8599	0.1401
Promedio				0.8232	0.1768
Desviación Estándar				0.0939	0.0939

7.3 ANÁLISIS DE VARIACIONES GEOFÍSICAS

7.3.1 EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO (1992)

En este apartado se señalan algunas de las características del medio geológico del área de la Presa El Cuchillo, que fueron obtenidos de las investigaciones geológicas y geofísicas efectuadas en el año de 1992 (UANL-UEM, 1993a).

Durante el llenado de la Presa se esperaba que surgieran fenómenos hidrogeológicos indeseables en el territorio adyacente de la Presa, tales como: la anegación de centros de población (China, N.L.), ascenso del nivel freático con la consecuente salinización e inutilización de terrenos cultivables y la aparición de agua salada e impropia para uso doméstico en pozos y norias.

Como resultado de los estudios geológicos, se pronosticó la aparición de filtraciones en la parte Norte de la Presa, a través de zonas de intenso fracturamiento de las rocas, conjugándose esto a que en el área del Dique existe coincidencia entre los rumbos de las rocas y las posibles direcciones de filtración. Las pérdidas esperadas por filtraciones se estimaron bajas, ya que el espesor de la zona de intemperismo de las rocas del Eoceno es menor a los 15 metros y la permeabilidad es baja (0.0005 cm/s); además, las filtraciones serían evitadas por el bajo gradiente que existe en el Dique, el cual forma un pequeño parteaguas (CNA, 1993).

La posibilidad del incremento del nivel freático de las aguas al Norte de Dique, presumía el riesgo de anegamiento del tramo de la carretera Monterrey–China. Las condiciones de relieve, estructura geológica, existencia de fracturas y las propiedades de filtración de las rocas, no excluían la posibilidad de filtraciones bajo la Cortina y el Dique. No obstante, el anegamiento de la población de China sería evitado por la cuenca que se extiende a lo largo de la Cortina, la que actuaría como drenaje natural.

También se realizaron investigaciones geofísicas mediante métodos geoelectrónicos (SEV's), de su interpretación se calculó el valor de T , mismo que se utilizó como parámetro de pronóstico. De estas investigaciones se delimitaron dos zonas con

mayor probabilidad de filtración de agua. La primera se encuentra ubicada en el área de la Cortina en donde los valores más altos de T , obtenidos sobre un perfil realizado a lo largo de la construcción en el embalse alcanzan 2500 – 3000 ohm·m². Por otra parte, el rumbo de las capas y la Cortina son paralelos, sin embargo, la estructura y un rumbo de las diaclasas son perpendiculares, lo que aumenta la probabilidad de filtración. Puesto que la Cortina contiene una pantalla impermeable y dispone de pozos de control piezométrico a lo largo del eje, se decidió realizar solamente monitoreo hidrogeológico en la parte Sureste de ella, la Loma Los Pozos.

La segunda zona donde fueron pronosticados sitios de alta probabilidad de fugas de agua corresponde al Dique. La existencia de diaclasas y fallas perpendiculares al Dique y la ausencia de una pantalla impermeable en esta construcción, así como el descenso (15 m) del nivel del terreno aguas abajo con respecto al nivel ordinario de la Presa aumentaban la posibilidad de existencia de procesos de filtración. Los lugares señalados como más probables fueron los SEV's cero, tres y diez, de donde se pueden calcular valores de T del orden de 800-1200 ohm·m².

Las conclusiones generales de los estudios fueron:

- 1 - Las areniscas y lutitas que afloran en el lecho del Vaso y que componen una parte de sus riberas están cortadas por fracturas, que pueden convertirse en conductos de fugas de agua de la Presa, básicamente en dirección normal al Dique.
- 2 – Según revelan los datos geofísicos, el fracturamiento puede alcanzar los 30 metros de profundidad o más, lo que crea un riesgo potencial de anegar las tierras contiguas al Dique y al territorio de la población de China.

Los puntos expuestos anteriormente fueron acertados porque:

- 1 - Las filtraciones esperadas frente al sondeo cero se han manifestado; sin embargo, las pérdidas no son bajas, ya que se estima que los gastos son del orden de 20 l/s.
- 2 - El aumento en el nivel freático ha sido evidente en la zona de la Cortina, donde existe una filtración; no manifestándose esto en el área del Dique, donde se esperaba ocurriera.

3 - Una filtración surgió frente al SEV 7 del Dique, la cual no fue pronosticada con base en los valores T , pero su aparición pudiera estar relacionada al intenso fracturamiento del lugar.

4 - Aparición de aguas saladas en la filtración frente al SEV 0, en donde se esperaban filtraciones de aguas con características químicas semejantes a las aguas del Vaso.

7.3.2 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS GEOELÉCTRICOS E HIDROGEOLÓGICOS

La correlación entre la conductividad hidráulica y la resistividad ha sido estudiada por HEIGOLD *et al.* (1979), FROHLICH y KELLY (1985), NIWAS y SINGHAL (1985), CURTIS y KELLY (1990), GORMAN y KELLY (1990), MBONU *et al.* (1991) y QUARTO y SCHIAVONE (1994), entre otros; no pudiendo encontrar una correlación sencilla entre las dos propiedades antes mencionadas, obteniendo relaciones ambiguas, en algunos casos de tipo directa y otras de tipo inverso.

MAZAC *et al.* (1990) sugieren un modelo para explicar ambos tipos de correlaciones, proponiendo que las relaciones entre las propiedades dependen principalmente del tipo de roca y su porosidad. La forma de la relación, lineal o curvilinea, es modificada por la relación entre la dirección del flujo del agua subterránea, la estratificación y el tipo de resistividad.

Generalmente, la relación entre la conductividad hidráulica es directamente proporcional al tamaño de grano, lo que caracteriza los diferentes tipos de rocas. Por otra parte, en un particular tipo de roca la variación de la porosidad tiene una relación inversa (MAZAC *et al.*, 1985) tal y como se observa en la Figura 7.2

MAZAC *et al.* (1990) concluyen que se puede determinar la conductividad hidráulica a partir de los valores de resistividad, debiéndose calcular en cada caso la ecuación característica del medio geológico que se pretende estudiar.

Para el presente trabajo no es posible calcular la conductividad hidráulica por no contar con estudios paramétricos, sin embargo, las posibilidades de hacerlo dependerán de la perforación de pozos y la realización de pruebas de bombeo.

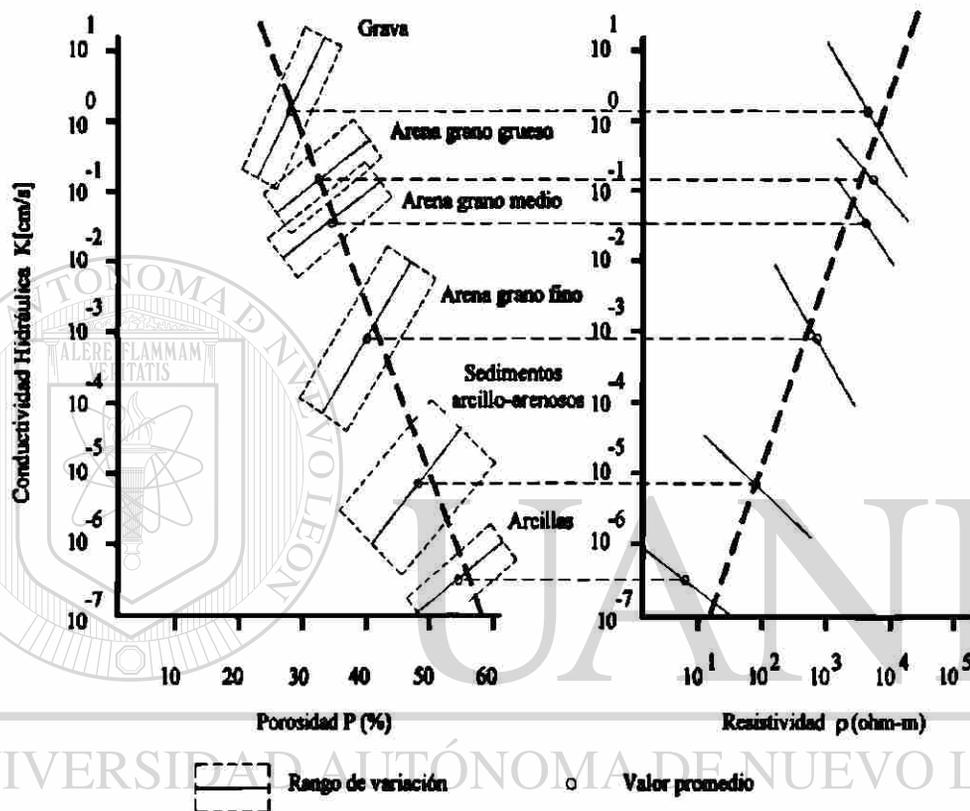


Figura 7.2 Relación entre la conductividad hidráulica, porosidad y resistividad para diferentes tipos de sedimentos (Tomada de MAZAC *et al.*, 1985).

7.3.3 PARÁMETROS PARA PRONÓSTICOS

El empleo de la resistencia transversal como parámetro de pronóstico de filtraciones en zonas aledañas a Presas es común en ingeniería geofísica, ya que tiene una relación directa con la transmisibilidad hidráulica de las rocas, y por otra parte, no es afectado por el principio de equivalencia (ORELLANA, 1982). Sin embargo, cuando se calcula el valor de T sólo se toman en cuenta las capas de las cuales se conoce su resistividad y su espesor, no incluyéndose la última capa por no conocerse su espesor, pudiendo ésta ser de importancia al tener valores altos de resistividad.

En este trabajo se presenta una modificación a la forma tradicional de determinar T , y esta consiste en calcular T hasta una profundidad determinada H . El valor de la profundidad H equivale a la suma de los espesores de las capas obtenidas de la interpretación de la curva de resistividad aparente promedio, que resulta del análisis estadístico de los SEV's.

La ecuación es semejante a la tradicional, difiriendo en que a la modificada T_m se le agrega un miembro más de la sumatoria

$$T_m = T + \rho_n \left(H - \sum_{i=1}^n h_i \right), \quad (14)$$

donde

$$T = h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \dots + h_i \rho_i + \dots + h_{n-1} \rho_{n-1}, \quad (15)$$

h_i y ρ_i son la resistividad específica y espesor de la i -ésima capa.

En este trabajo se utiliza un valor de H de 40 m, los valores de resistividad y el espesor de cada capa se presentan en las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 para los años 1992, 1995 y 1997, respectivamente. En ellas se incluyeron los valores de T y T_m , observándose que los valores de T_m son mayores que los de T . Para comparación entre los valores de T y T_m se calculó la Diferencia de la resistencia transversal (DT) para cada sondeo.

Con el fin de apreciar los cambios en la resistencia transversal de las rocas se calcularon los cocientes de las resistencias transversales para los diferentes años, los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 7.5.

TABLA 7.2
RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1992.

SEV	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
h1	1.3	2.7	60	1	1	1	1	1	0.8	2.8	1
ρ1	9.5	9.8	6	4	5	5.5	16.7	14	12	65	63
h2	16.6	16		13	12	6.5	2.5	3	4	37.2*	36
ρ2	3.6	6.3	40	11.5	16	8	25	90	71	18.5	34
h3	22.1*	20		14	27*	22.5	9.3	22	35.2*		3*
ρ3	60	3.7		15	7	16	70	21	25		17
h4		1.3		12*		10*	27.2*	14*			
ρ4		10		7		7.7	15	8			
T	72	201	360	363	205	418	730	746	293	182	1230
Tm	1404	214	240	447	386	495	1138	858	1173	870	1281
* DT	1332	13	0	84	181	77	408	112	880	688	51

* Este valor se obtiene restándole a H la suma de los espesores anteriores

$DT = Tm - T$, ρ están en $\text{ohm}\cdot\text{m}$, los de h en m , y los de T y Tm en $\text{ohm}\cdot\text{m}^2$.

TABLA 7.3

RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1995.

SEV	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
h1	1.2	7.4	2	1	2	1	1	4	1.7	1	1
ρ1	145	5	31	11	17	20	44	10	90	56	84
h2	5.4	7.4	7	3.5	7.5	13	4	5	6	3.5	3.5
ρ2	28	19	7	4	12	11	18	66	43	21	21
h3	22	22	25	20	30.5*	26*	8	11	32.3*	35.5*	20
ρ3	6.7	2	4.5	9	9	9.5	6	5	18	13	6.5
h4	11.4*	3.2*	6*	15.5*			27*	20*			15.5*
ρ4	17	11	9	4.5			16	14			17
T	473	222	224	205	124	163	164	425	411	130	288
Tm	669	257	278	275	399	410	596	705	992	591	551
DT	196	35	54	70	275	247	432	280	581	461	263

* Este valor se obtiene restándole a H la suma de los espesores anteriores

TABLA 7.4
RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1997.

SEV	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
h1	1.7	0.8	1.4	0.8	2.5	2.5	1.7	1	3.4	0.9	0.8
p1	87.4	33.4	57.5	31.8	47.5	58.3	29.7	28.1	81.2	120	10.4
h2	7.1	7.6	7.5	7.8	5.2	7.6	7.1	4.1	3.8	7.5	4.1
p2	15.7	7	11.5	9.6	13.8	26.8	11.9	4.8	49.1	17	6.5
h3	16.2	17.8	17.3	7.3	32.3*	29.9*	8.8	3.9	32.8*	31.6*	35.1*
p3	4.8	5.0	4.5	3.3	9.5	9.1	4.9	68.5	18.1	12.5	17
h4	15*	13.8*	13.8*	24.1*			22.4*	31*			
p4	13.4	7.3	8.9	22.1			14.6	9.1			
T	338	169	245	124	197	350	178	315	463	236	35
Tm	539	270	368	657	504	622	505	597	1057	631	632
DT	201	101	123	533	307	272	327	282	594	395	597

* Este valor se obtiene restándole a H la suma de los espesores anteriores

TABLA 7.5
COCIENTES DE RESISTENCIA TRANSVERSAL PARA DIFERENTES TIEMPOS.

SEV	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
T1995/T1992	6.56	1.10	0.93	0.56	0.60	0.38	0.22	0.57	1.40	0.71	0.23
T1997/T1992	4.69	0.84	1.02	0.34	0.96	0.83	0.24	0.42	1.58	1.29	0.03
Tm1995/Tm1992	0.47	1.20	1.16	0.61	1.03	0.82	0.52	0.82	0.84	0.67	0.43
Tm1997/Tm1992	0.38	1.26	1.53	1.47	1.31	1.26	0.44	0.69	0.90	0.93	0.49

Se observa que los valores de T entre 1995/1992, oscilan entre 0.22 a 6.56, siendo los tres valores más pequeños para los sondeos 4, 10 y 0, del orden de 0.22 a 0.38. Si hacemos la misma comparación para los valores de Tm tenemos que los valores más pequeños se ubican en los sondeos 7, 10 y 0. Esta comparación se realiza para determinar las zonas que han tenido cambios considerables en sus valores de resistencia transversal debido a la saturación de las rocas.

En la Figura 7.3 se presenta la gráfica de los valores de T para cada uno de los sondeos y para los diferentes años. Para el año 1992 se observa que existen valores altos (mayores de 600 $\text{ohm}\cdot\text{m}^2$) en los sondeos 10, 3 y 0, siendo estas las zonas de mayor riesgo por las fugas que pudieran suceder.

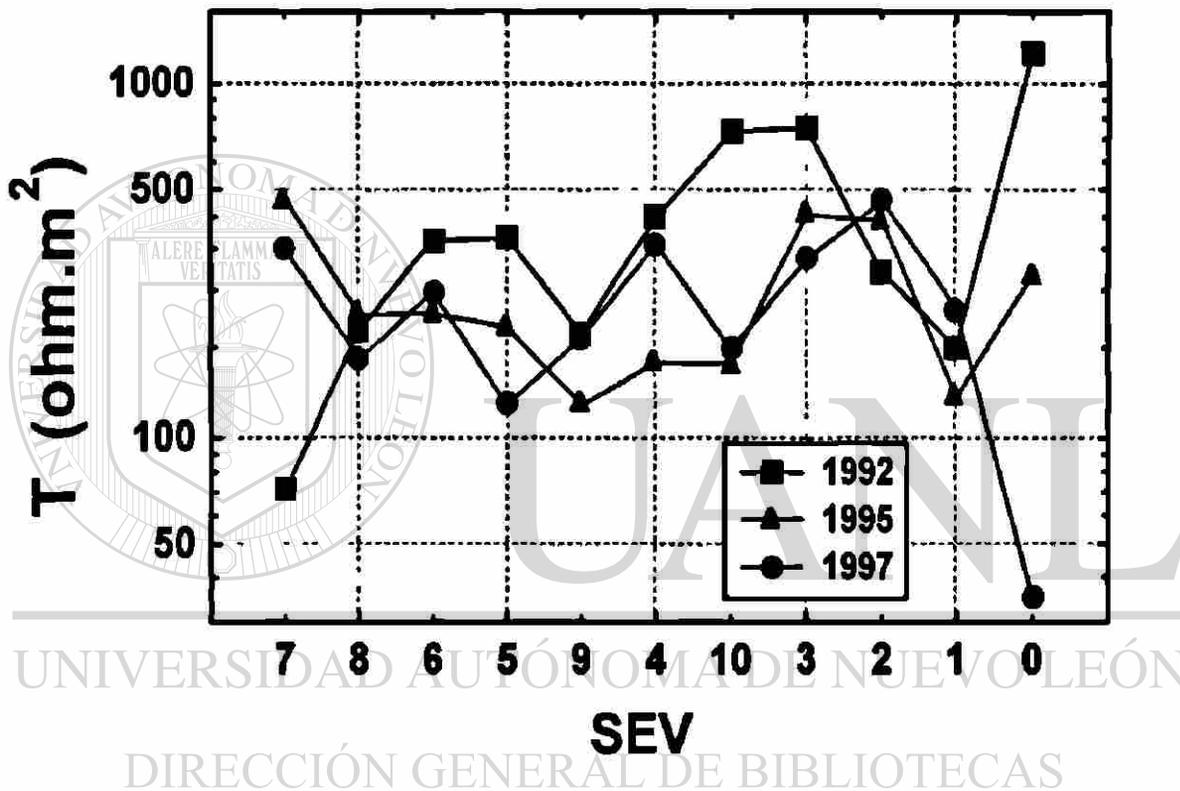


Figura 7.3 Gráfica de los valores de T para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.

Los valores modificados de la resistencia transversal T_m se han graficado (Figura 7.4) para los años 1992, 1995 y 1997. Se muestra que, además de las zonas destacadas en la Figura anterior, los puntos 7, 2 y 1 también tienen valores altos y pueden ser pronosticados como zonas potenciales de filtración.

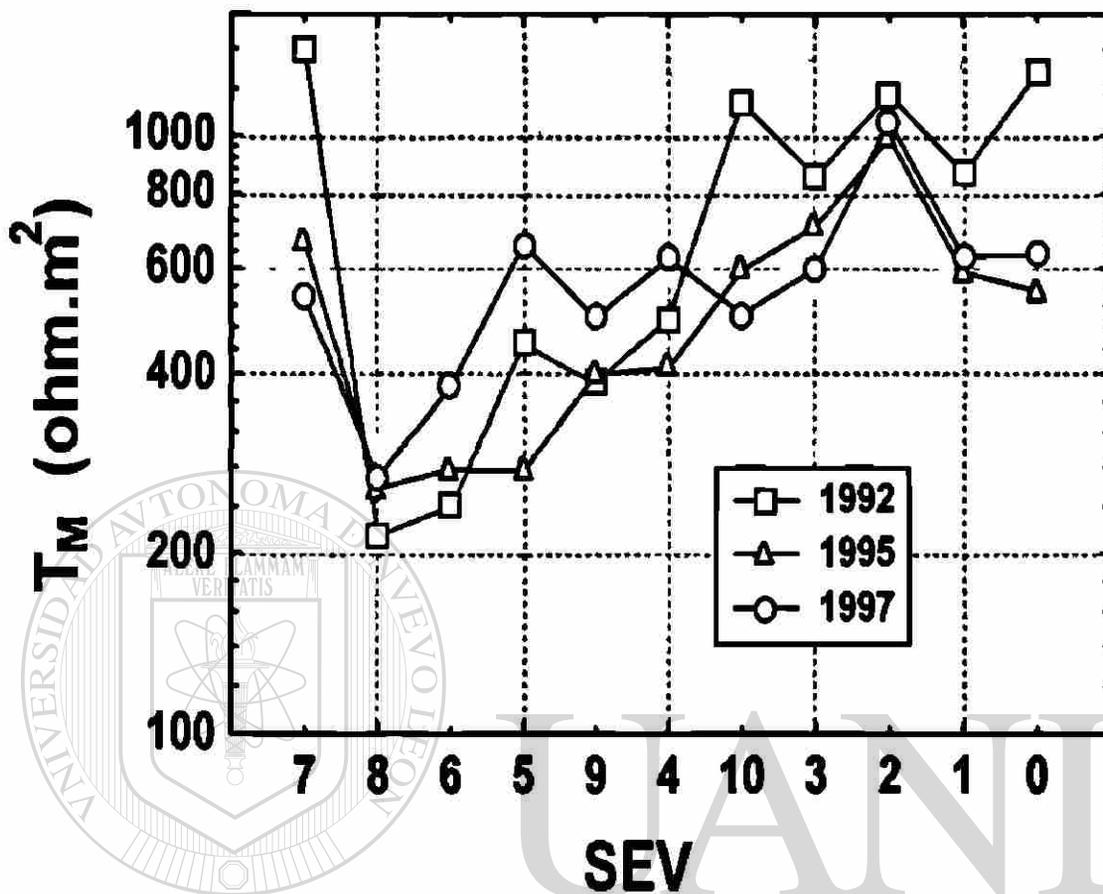


Figura 7.4 Gráfica de los valores de T_m para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.

7.4 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS CON BASE EN LOS DATOS GEÓLOGO-GEOFÍSICOS

Con el fin de determinar la situación hidrogeológica del área de estudio, se procede a analizar, con cada uno de los métodos utilizados, las características físicas de las rocas que tienen estrecha relación con el comportamiento del agua dentro de un sistema.

7.4.1 DATOS ESTRUCTURALES

En el área de estudio se realizaron levantamientos de rumbo y buzamiento de las diaclasas en tres afloramientos cercanos a la Cortina y el Dique de la Presa. En la Figura 7.5 se presenta un concentrado de los datos de rumbos de diaclasas, notándose que existen tres sistemas.

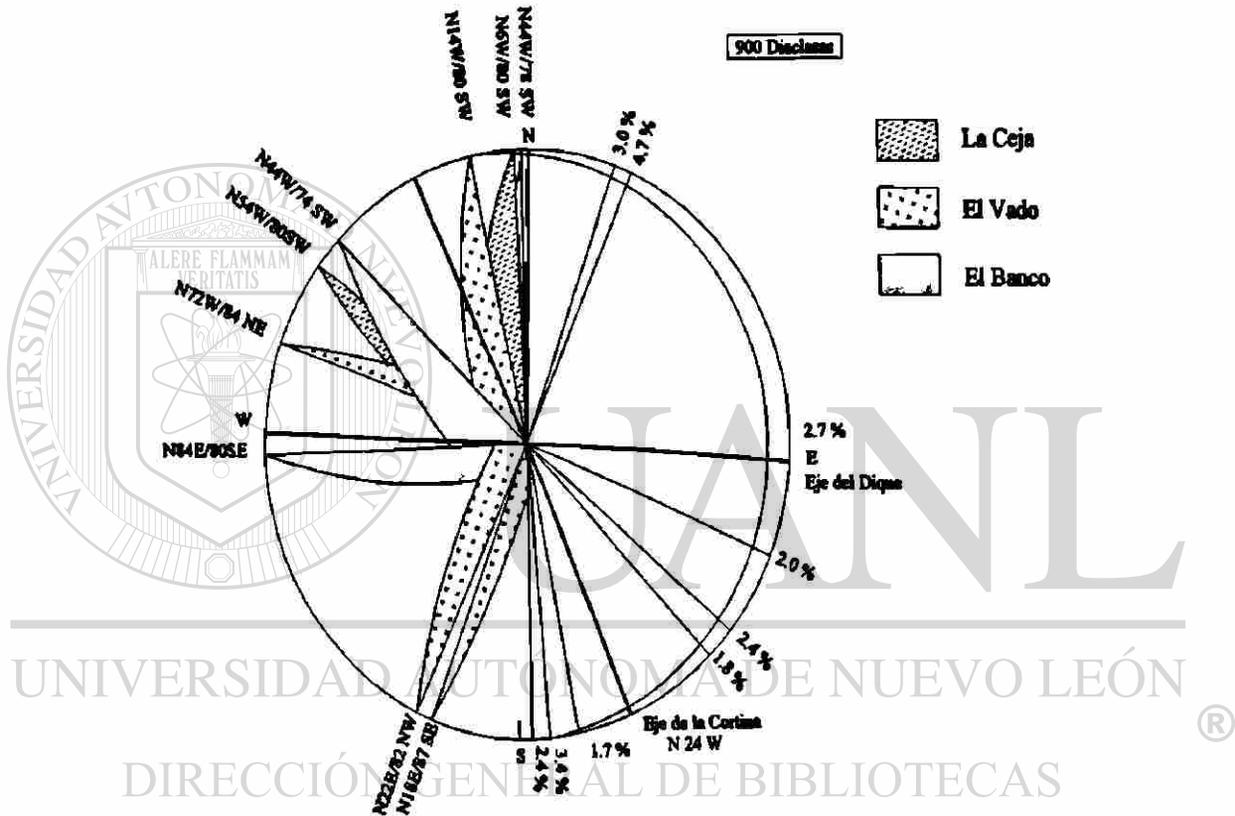


Figura 7.5 Elementos estructurales (diaclasas y estratificación) para el área de estudio.

El primero, con rumbo entre N14W y N20E, reviste mayor importancia en cuanto a filtraciones, ya que es prácticamente perpendicular al Dique. El segundo sistema es ortogonal al primero con rumbo E-W y que, para el caso de la Cortina, representa una condición favorable para filtraciones. Por último, existe el tercer sistema que tiene un rumbo de N44W a N72W y que parece estar relacionado con la filtración frente al SEV 7 en el Dique; además, presenta coincidencia en rumbo con las fracturas mayores de la región.

La abertura de las diaclasas varía de 0.5 a 1.2 mm, lo que conjugado con su separación entre ellas, que oscila entre 51.18 y 94.88 cm, da como resultado conductividades hidráulicas del orden de 10^{-4} a 10^{-3} m/s en las areniscas; no obstante, algunas de estas se encuentran rellenas por limos y arcillas, y en ocasiones yeso, lo que podría traer como consecuencia la disminución del valor de conductividad hidráulica.

7.4.2 DATOS DE MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Basándonos en la información obtenida de los perfiles electromagnéticos (Fig. 6.8) a lo largo del Dique, se puede establecer que la parte superficial del corte geológico (< 15 m de profundidad) puede ser dividida en dos zonas: la primera abarca de los SEV 7 al 9, en donde la conductividad es alta, y la otra, del SEV 4 al 2, donde la conductividad es baja. La conductividad alta se asocia con saturación del subsuelo por flujo lateral del agua del Vaso, mientras que los valores de conductividad bajos hacen suponer que las rocas en este lugar no se encuentran saturadas por ser esta una parte alta topográficamente. Cerca del SEV 1 se encuentra un pico con valor muy alto de conductividad lo que pudiera estar relacionado con una zona del subsuelo ya saturada.

Se observó que los cambios laterales de la conductividad son bruscos, es decir, existen valores altos de conductividad que contrastan a unos pocos metros con valores bajos. Los valores bajos conductivos se relacionan con las capas de areniscas no saturadas, mientras que los altos, con las lutitas o areniscas saturadas. Si se correlacionan en la superficie los picos de ambos perfiles obtendríamos una dirección N15W, coincidiendo esta con los rumbos de las capas y con la dirección de uno de los juegos de diaclasas. Esta es la dirección que pudieran seguir las filtraciones en la parte Este del perfil, favorecidas por el gradiente superficial, ya que el Dique está construido sobre un parteaguas de topografía suave.

7.4.3 DATOS DE ANISOTROPÍA DE PROPIEDADES FÍSICAS

En el año de 1992, entre los sondeos 9 y 10, se realizaron tres perfiles circulares con un ángulo de cambio de arreglo de 30° . La finalidad era establecer la orientación

dominante de las rocas y su relación con la variación de la resistividad específica (UANL-UEM, 1993b).

Para elevar al máximo la sensibilidad del método se utilizó un dispositivo dipolar ecuatorial. En los tres perfiles circulares es predominante la dirección N15W, la que coincide con el rumbo de las rocas, así como con la orientación principal de la fracturación, ambas con dirección normal al Dique, lo que puede favorecer la filtración de aguas de la Presa.

Con el fin de determinar la anisotropía de las velocidades sísmicas en el macizo rocoso, se realizaron cuatro perfiles azimutales, con una distancia angular de 45°, con el método de primeros arribos. De estos estudios se concluyó que el contraste de velocidades, según las diferentes direcciones, se relaciona con la orientación predominante de las diaclasas.

De los anteriores estudios sísmicos se determinó una frontera suavemente ondulada a una profundidad de 5 – 7 m, la cual corresponde al techo de las areniscas no alteradas por debajo de la zona de intemperismo. Por otra parte es evidente la existencia de un sistema de fracturas subverticales con un rumbo N8W, prácticamente perpendicular del Dique, la profundidad que alcanzan las fracturas es de al menos 10 metros en las areniscas (UANL-UEM, 1993b).

7.4.4 PROPIEDADES HIDRÁULICAS CON BASE EN SEV's

Uno de los métodos geoelectrónicos para determinar las propiedades de las rocas son los SEV's, los cuales se aplicaron a lo largo del Dique en tres campañas. Se han interpretado las curvas de resistividad aparente, y con los datos obtenidos, se pretende calcular la porosidad y la conductividad eléctrica del fluido que rellena los poros.

Para lograr lo anterior se siguió la metodología propuesta por STEINICH *et al.* (1997), la cual tiene sus bases en la ley de Archie, que en su forma más explícita es

$$\rho_r = (a b \eta^m S^n) \rho_a; \quad (16)$$

donde ρ_r es la resistividad de las rocas, a y b los coeficientes según tipo de roca, η la porosidad, m el parámetro de cementación, S el grado de saturación, S^n el índice de resistividad y ρ_a la resistividad del agua.

De la ecuación anterior se puede despejar η con la finalidad de dejar la porosidad en función de las demás variables y obtenemos

$$\eta = (ab\rho_a/s^n\rho_r)^{1/m}. \quad (17)$$

Por considerarse que tenemos areniscas bien cementadas se tomaron (ORELLANA, 1982) los valores de a igual a 0.6 y b igual a 0.6. Se supone que existe en algunos puntos saturación del 100%, el valor del índice de resistividad es de 2.25 y el parámetro de cementación de 1.7. Los valores de ρ_r son las resistividades específicas de las rocas del corte geológico y ρ_a es la resistividad del agua contenida en los poros y es de 2.358 ohm-m.

Con los datos del párrafo anterior y los obtenidos de la interpretación de los sondeos de 1997, se han calculado las porosidades de las rocas en los sitios donde los SEV's tuvieron cambios significativos de Tm . Para el sondeo cero, donde existe una filtración, los valores obtenidos del porcentaje de porosidad son de 22.90, 30.19 y 17.15 % para rocas con espesores 0.8, 4.1 y 35.1 m y resistividades 10.4, 6.5 y 17 ohm-m, respectivamente. En el sondeo 7 los valores de porosidad son de 6.54, 17.97, 36.09 y 19.73 % para espesores de 1.7, 7.1, 16.2 y 15 m con resistividades de 87.4, 15.7, 4.8 y 13.4 ohm-m, respectivamente. En el sondeo 10 la porosidad es de 12.35, 21.15, 35.65 y 18.76 para espesores de 1.7, 7.1, 8.8 y 22.4 m y resistividades de 29.7, 11.9, 4.9 y 14.6 ohm-m.

Por otra parte, para calcular la resistividad del agua que se encontraba en el acuífero original se supone que los parámetros, a , b , m , n , η y S , para la parte baja del sondeo 0, no han cambiado con el tiempo de 1992 a 1997.

Se puede determinar que el mecanismo de filtración en la parte Este del Dique, frente al sondeo cero, es aquel donde el agua salada, que se encontraba en el acuífero original, tiende a mezclarse con agua del Vaso, por lo que la conductividad del agua de la filtración disminuye al transcurrir el tiempo, dándose también un aumento en el nivel del agua del acuífero, como se ilustra en la Figura 7. 6. La mezcla de aguas es apoyada por los datos geoquímicos, en donde para los datos de abril de 1995 se han calculado proporciones de agua de la Presa y agua del acuífero del orden de 4.66:1.

El ascenso del nivel freático tiene las siguientes evidencias:

a) Las Primeras manifestaciones de filtraciones tienen lugar a aproximadamente un kilómetro al Norte del Dique donde la topografía es más baja (desnivel del orden de 15 metros), y a medida que avanza el tiempo estas filtraciones se manifiestan más cerca del Dique hasta quedar a escasos metros (<de 10 m) de la estructura del mismo.

b) En las secciones geoelectricas se observa que los cambios en los valores de resistividad específica al transcurrir el tiempo tienen lugar primeramente en la parte baja de dicha sección, especialmente en el Este, disminuyendo considerablemente la resistividad específica de las rocas por la saturación de agua del acuífero.

El curso que siguen las aguas es a través de las areniscas, ya que estas rocas tienen conductividades hidráulicas altas debido a su porosidad primaria, calculada del 6 a 15% mediante análisis de fotografías de secciones delgadas y de 6 a 35 % según estimaciones con base en los datos geoelectricos. Esta discrepancia en los valores de porosidad podría deberse que con los datos geoelectricos se puede considerar la porosidad secundaria debida a la fracturación de las rocas.

El ascenso del agua no es en forma vertical ya que las lutitas, con inclinación de 10° al NE, lo evitarían ante su baja conductividad hidráulica; más bien, el flujo del agua es siguiendo el echado de las areniscas, esto apoyado en que las filtraciones se manifiestan en estas rocas que forman las crestas topográficas de la región frente al Dique. Las filtraciones se ven favorecidas por la disposición de las capas y su rumbo prácticamente al Norte; además la geología estructural y la anisotropía, en los valores

de resistividad, muestran que existe un sistema de fracturamiento en dirección perpendicular al Dique, lo que ayuda a que las filtraciones tengan lugar.

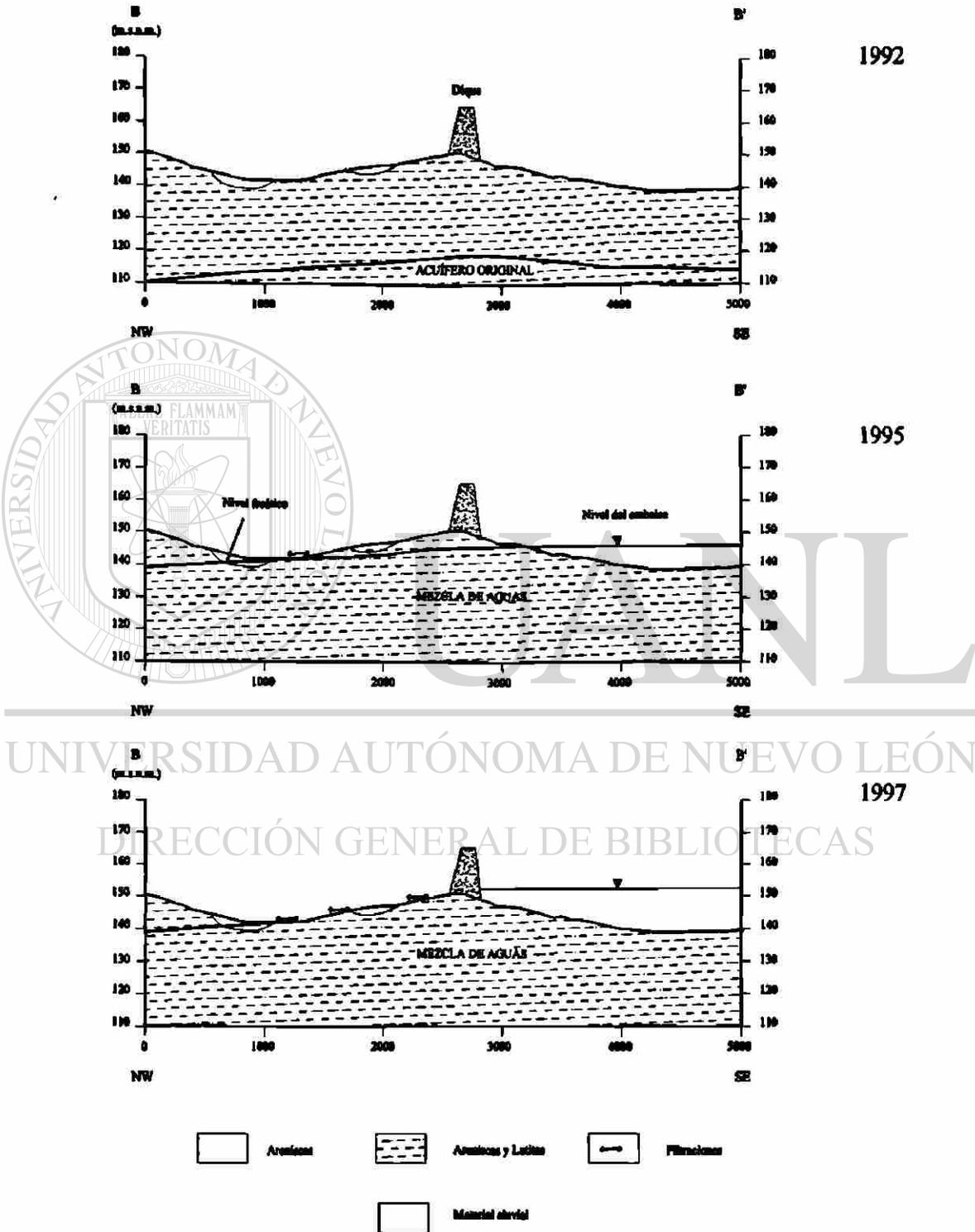


Figura 7.6. Modelo de ascenso del nivel freático en el área del Dique para un corte geológico perpendicular al Dique cerca del sondeo cero.

En cuanto a las filtraciones en la parte Oeste del Dique, el mecanismo propuesto está relacionado con flujos laterales provocados por la diferencia de nivel entre las aguas de la Presa y los niveles topográficos aguas abajo del Dique. Este mecanismo tiene lugar a través de fallas y diaclasas, evidencia de lo anterior es el manantial intermitente localizado entre los sondeos 7 y 8 de aguas con contenidos de sales semejantes las aguas del Vaso.

Existe poca información disponible de la Cortina, sin embargo, se estima que el mecanismo de filtración coincide con el del Dique en cuanto a la infiltración del agua del Vaso y su mezcla con el agua del acuífero ya existente, pero el ascenso del agua tiene lugar a través de fallas, ya que el buzamiento de las areniscas está en la misma dirección de la presión hidrostática.

7.6 PROPUESTA PARA FUTUROS ESTUDIOS EN SITIOS DE PRESAS

7.6.1 ESTUDIOS A REALIZARSE PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN

Enseguida se presenta, con base en la experiencia adquirida en el desarrollo de este trabajo, una propuesta de metodología a ser empleada en el estudio de sitios de construcción de Presas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los requisitos indispensables para la construcción de una Presa son: contar con una recarga hidrológica suficiente en una cuenca, que se cumplan las condiciones geomorfológicas para cerrar dicha cuenca y lograr tener un Vaso de almacenamiento. Cumpliendo lo anterior se procede a la búsqueda de materiales para la construcción.

El otro punto indispensable, no para la construcción, sino para tener un control de las condiciones del sitio, es realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos del área, por lo que se propone se realicen las siguientes investigaciones:

Geológicas:

- **Determinación de la distribución de las unidades geológicas mediante reconocimiento de campo, interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, poniendo énfasis en las unidades que pudieran presentar alta permeabilidad hidráulica y salinidad.**
- **Estudio estructural a detalle para determinar las zonas de fracturas que pudieran dar lugar a filtraciones después de construida la Presa. Con esta información se puede estimar la permeabilidad del macizo rocoso.**
- **Perforación de pozos someros y profundos en el sitio de la Cortina y demás Diques para conocer la litología del subsuelo y posibles zonas de carstificación. Además, perforar otros pozos aguas abajo de la Cortina y los Diques para usarlos en la observación de los cambios hidrogeológicos.**
- **Realización de pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad de las rocas, especialmente en los sitios de construcción de la Cortina y de el (los) Dique(s), así como en las estructuras que servirán como Diques naturales.**
- **Determinación de la porosidad y de los componentes mineralógicos de las rocas de la zona de estudio, así como de los materiales que rellenan las diaclasas y fracturas.**
- **Estudios de los datos del clima para determinar la precipitación y la evaporación en la cuenca y en la zona del Vaso.**

Geoquímicas:

- **Determinación de las propiedades químicas y físicas de las aguas de la zona de estudio.**
- **Estudios isotópicos de las aguas de la zona para determinar el origen de las mismas.**

Geofísicas:

- **Realización de sondeos eléctricos verticales para determinar la resistividad específica de las rocas y calcular los parámetros de pronóstico de zonas de fugas**

de agua; así como la realización de perfiles circulares para determinar la orientación de las discontinuidades de las rocas.

- Estudio magnetométrico a detalle para determinar zonas de fracturamiento.
- Investigaciones por emanación de radón para determinar las zonas de fracturamiento y estimar la permeabilidad hidráulica.
- Estudios sísmicos para determinar el grado de fracturamiento y su dirección.
- Realización de perfiles electromagnéticos para refinar los estudios de control estructural.
- Registros geofísicos en los pozos para determinar, mediante las propiedades físicas, el tipo y la distribución de las rocas.

7.6.2 ESTUDIOS A REALIZARSE POSTERIORES A LA CONSTRUCCIÓN

Durante y después del llenado de la Presa se recomienda efectuar los siguientes estudios:

Geológicos

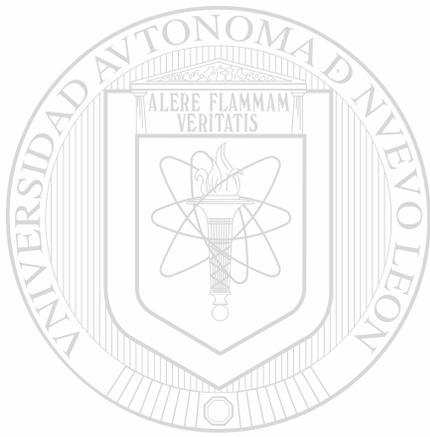
- Realización de pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad de las rocas y evaluar la cementación de las obras.
- Monitoreo periódico de las filtraciones en cuanto a sus gastos.
- Obtención de datos de nivel del Vaso y de los pozos de observación para determinar si existe intercomunicación y evaluar su intensidad.
- Monitoreo de los niveles piezométricos e interpretación de los datos para determinar el régimen hidrogeológico de las obras y las áreas aguas abajo de las mismas, así como monitorear la estabilidad (asentamientos) de la construcción mediante la información generada por los inclinómetros.

Geoquímicos

- Determinación de las propiedades físicas y químicas de las diferentes aguas de la región (río, Vaso, filtraciones, acuífero, etc.) y de las variaciones de estas propiedades en el tiempo.

Geofísicos

- **Monitoreo mediante sondeos eléctricos verticales de los cambios en las propiedades de las rocas al modificarse la situación hidrogeológica por el llenado del Vaso.**
- **Levantamiento de datos de potencial natural para determinar las zonas de ascenso o descenso de las aguas, tanto dentro del Vaso como aguas abajo de los Diques.**
- **Perfiles electromagnéticos para determinar los cambios temporales en las propiedades de las rocas al cambiar el régimen hidrogeológico.**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los estudios realizados en el área de la Cortina y el Dique de la Presa El Cuchillo se concluye lo siguiente:

- Las rocas que constituyen el subsuelo, en donde se construyó la Presa, son una secuencia de areniscas y lutitas de la Formación Mount Selman del Eoceno. Las areniscas presentan espesores variables desde centímetros hasta metros, y una orientación promedio NNW-SSE y buzamiento de 6 a 10° hacia el NE. Sobreyacen a estas rocas sedimentos aluviales y conglomerados del Cuaternario.
- Los componentes principales de las areniscas son granos de cuarzo y feldespatos angulosos (25 a 50 %); conteniendo, además, fragmentos líticos y limolita cementada con micrita. Presentan una porosidad de 6 a 15% según estimaciones petrográficas, y del orden de 20 a 30% según estudios de resistividad de las rocas.
- Las orientaciones principales de las fracturas y diaclasas se pueden agrupar en tres sistemas, donde sus promedios de rumbos son N-S, E-W y N50W. En dichas direcciones aumenta la conductividad hidráulica de las areniscas, provocando filtraciones al pie de la Cortina y el Dique. La abertura de las fracturas es de 0.5 a 1.2 mm y el número de ellas por metro es de 1 a 2. En cuanto a las propiedades de las rocas, se ha determinado que la conductividad hidráulica tiene valores de 0.0001 a 0.0005 cm/s.
- Los datos piezométricos en la Cortina han mostrado que existe un acuífero múltiple, en donde se han identificado hasta cuatro pisos hidrogeológicos, donde las areniscas actúan como almacenadoras y conductoras de agua.
- Se han presentado filtraciones al pie de la Cortina y del Dique, teniéndose un gasto total aproximado de 250 l/s, siendo la concentración de iones muy alta. Las concentraciones químicas de los diferentes iones pueden explicarse como una mezcla

de las aguas del Vaso y las aguas del acuífero, en donde las proporciones son de 4.66:1, respectivamente.

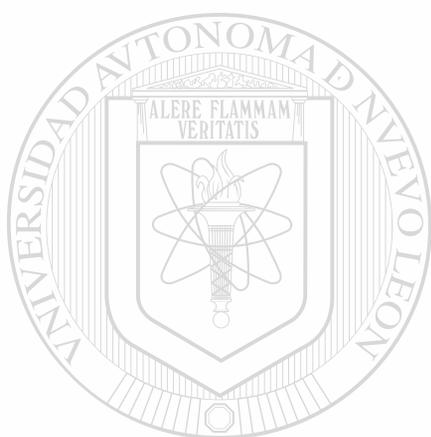
- La concentración de especies de iones en las aguas de filtración de la Cortina no cambia significativamente con respecto al tiempo. Las del Dique si cambian en forma decreciente, para luego incrementarse, lo que supone que ya ha existido flujo de agua de varios acuíferos, al menos dos. Las altas concentraciones pudieran estar relacionadas con disolución de evaporitas, lo que se podría acelerar con la recarga de la Presa.
- De los Sondeos Eléctricos Verticales se ha observado que existen variaciones temporales en la resistividad de las rocas, manifestándose disminución de sus valores de abajo hacia arriba del corte geoelectrico, relacionadas estas variaciones con el grado de saturación de las rocas. Los cambios que se observan son más evidentes hacia la parte Este del Dique.
- El parámetro de Resistividad Transversal T , propuesto en la literatura, es una herramienta utilizada con el fin de pronosticar zonas de filtraciones; sin embargo, el parámetro de Resistividad Transversal Modificado Tm muestra ser mejor, ya que con él si se pudieron pronosticar zonas de filtración, que el parámetro T no podía evidenciar.
- El mecanismo de filtración en el Dique consiste en que las aguas del Vaso pasan a través de las areniscas y debido al gradiente topográfico, sigue el rumbo de las capas hacia el Norte, su ascenso es a través de las mismas areniscas, manifestándose las filtraciones en las partes de relieve alto; en cambio, para la Cortina, el mecanismo sugiere filtración similar a la del Dique, pero la salida es a través de fallas.
- Teniendo como base los estudios efectuados, se establece que el pronóstico de filtración realizado en 1992 fue acertado y coincide con las condiciones hidrogeológicas que hoy día se registran en la zona. De la información obtenida en el presente estudio se pronostica que las filtraciones continuarán hacia la parte W del Dique a medida que aumenta el nivel del Vaso.
- Por último, basado en la experiencia del presente trabajo y de otros estudios en Presas, se presenta una propuesta metodológica a emplearse en el estudio de sitios

de almacenamiento de aguas. Se propone incluir la integración de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. Esta metodología contempla las investigaciones a realizarse, previas a la construcción, así como las que se deben realizar con el fin de monitorear las condiciones de estabilidad de las obras y del cambio en el régimen hidrogeológico.

Con el fin de tener un mejor control de las condiciones geólogo-geofísicas en el área de la Presa El Cuchillo, se recomienda:

- Continuar con la toma de datos geofísicos en el área del Dique. Es recomendable ya que esto nos permitirá observar los cambios en la distribución de la resistividad de las rocas debido a su relación con el contenido de agua; además, realizar pruebas de laboratorio y de campo para determinar las propiedades como transmisividad hidráulica y más pruebas de porosidad, parámetros muy importantes para estudios hidrogeológicos.
- Realizar estudios de potencial natural dentro y fuera del Vaso con el fin de determinar las zonas de ascenso y descenso de agua.
- Los estudios geoquímicos de las aguas del área deben continuar con la finalidad de obtener los datos que permitan elaborar un modelo de evolución, así como los cálculos del equilibrio de especies minerales, esto con el objetivo de verificar si los procesos de disolución de evaporitas (yeso y halita) tienen lugar y en qué magnitud.
- Crear un banco de información sobre los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos del área para continuar las investigaciones, esto con el fin de no repetir esfuerzos en futuros estudios.
- Perforar algunos pozos aguas abajo del Dique que sirvan de plataforma para el monitoreo de los valores del nivel del agua y permitan evaluar el riesgo hidrogeológico de la obra hidráulica.

- Realizar estudios isotópicos con el fin de ayudar a determinar el origen de las aguas de la región y refinar los datos de mezclas.
- Elaborar los estudios de impacto ambiental debido a obras hidráulicas como la Presa El Cuchillo – Solidaridad, antes, durante y después de la construcción de la obra, con el fin de conocer el impacto ambiental.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOGRAFÍA

APHA-AWWA-WPCF (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17a edición, Washington, D.C.1246 p.

BARTON, N., BAMFORD, W.E., BARTON, C.M., MACMAHON, B. et al., (1978) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 15, 319 - 368.

CAVAZOS, T. (1994) The influence of the southern oscillation on the winter climate of Nuevo Leon, Mexico. Geof. Int., 33, 295 – 302.

CNA (1993) Proyecto "Presa El Cuchillo". Informe Técnico. 30p.

CURTIS, B. y KELLY, W. E. (1990) Resistivity – recharge relationships – Field Study. J. Hydrol., 118, 39 – 53.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (1976) Hidrología subterránea, 2ª edición, Editorial Omega, España. Tomo II. 1154 p.

DAVIS, S.N. y DE WEIST, R. (1971) Hidrogeología. 2ª edición, Editorial Ariel. España. 563 p.

DE LEÓN-GÓMEZ, H., SCHETELIG, K. y MEIBURG, P. (1994) Abastecimiento de agua potable en el noreste de México. Ejemplo: Presa Cerro Prieto. Zbl. Geol. Palaont. Alemania, Tiel 1 (1/2), pp 593 - 602.

ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, O. (1986) Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I – Consideraciones geológico-petroleras. Bol. Asoc. Mexicana de Geólogos Petroleros, 38, 3 - 39.

FRANKLIN, J.A. y DUSSEAULT, M.B., (1989) Rock Engineering. 1ª edición. Editorial McGraw Hill. Estados Unidos de América. 600 p.

FRANKLIN, J. A., VOGLER, U.W., SZLAVIN, J., EDMOND, J.M. y BIENIAWKI, Z.T. (1979) Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 16, 141 – 156.

FREEZE, R.A. y CHERRY, J.A. (1979) Groundwater. 1ª Edición. Editorial Prentice Hall. Estados Unidos de América. 604 p.

FROHLICH, R.K. y KELLY, W.E. (1985) The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits. J. Hydrol., 79, 215 – 229.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

GARCÍA, E. (1981) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 1a. edición, México, D.F. 252 p.

GORMAN, T. y KELLY, W.E. (1990) Electrical – hydraulic properties of unsaturated Ottawa sands. J. Hydrol., 118, 1 – 18.

HEIGOLD, P.C., GILKESON, R.H., CARTWRIGHT, K. y REED, P. C. (1979) Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. Ground Water, 17, 338 – 345.

HEM, J.D. (1986) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3ª edición. Editado por el U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p.

INEGI (1978) Carta edafológica, Hoja China G14C29. Escala 1:50,000, 1a. edición, México, D.F.

INEGI (1991) Censo poblacional, El Norte. – Monterrey.

KENNEDY, W. (1992) A seccion from Terrell. Kaufman Country to Sabine Pass on the Golf of Mexico, Tex. G.S., An. Rp., 3, 41 - 125.

KÖPPEN, W. (1936) Das geographische System del Klimate. En: Koppen-Geiger, Handbuch del Klimatologie. Bd. 1, Teil C, Berlín, 44p.

LÓPEZ-RAMOS, E. (1982) Geología de México. 3ª Edición, México. Tomo 2, 454 p.

MAZAC, O., CISLEROVA, M., KELLY, W. E., LANDA, I. y VENHODOVA, D. (1990). Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectrical methods. En Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2, Environmental and Groundwater, p 125 – 131, ed. Ward, S. H., Soc. Expl. geophys., Tulsa.

MAZAC, O., KELLY, W.E. y LANDA, I. (1985) A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifer. J. Hydrol., 79, 1 – 19.

MAZOR, E. (1991) Applied chemical and isotopic groundwater hidrology. Ed Willey and Sons, 1ª edición, Estados Unidos de América. 274 p.

MBONU, P.C., EBENIERO, J.O., OFOEGBU, C.O. y EKINE, A.S. (1991) Geoelectic sounding for the determination of aquifer characteristics in parts of the Umuahia area of Nigeria. Geophysics, 50, 284 – 291.

MCBRIDE, M.B. (1994) Enviromental chemistry of soils. Ed. Oxford University Press, Inc. 1ª edición. Estados Unidos de América. 367 p.

MCNEILL, J.D. (1980) Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Technical Note TN - 6, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.

MEIBURG, P. (1987) Paleogeografía y desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental Septentrional, México. Actas Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., Linares, 2, 197 - 199.

MÉNDEZ-DELGADO, S. (1997) Inversión y modelado de campos eléctricos y magnéticos para números de inducción pequeños. Tesis Doctoral, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC, México.

MÉNDEZ-DELGADO, S., GÓMEZ-TREVIÑO, E. y PÉREZ-FLORES, M.A. (1999) Forward modelling of direct current and low-frequency electromagnetic fields using integral equations, Geophys. J. Int., 137, 336 – 352.

MOUSATOV, A.A., POLA-SIMUTA, C., SHEVNIN, V.A., KOUZOUB, N.A. y ANDAVERDE, J. (1996) Investigaciones geoeléctricas para pronosticar y monitorear procesos de filtración en la presa El Cuchillo, China, Nuevo León, México. Resumen. Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium. Terra Nostra. 8, 100 – 101. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MOUSATOV, A.A., POLA-SIMUTA, C., SHEVNIN, V.A., KOUZOUB, N.A. y ANDAVERDE, J. (1999) Geoelectrical studies to predict and monitor the filtration process on the reservoir at Nuevo Leon, Mexico. Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Proceedings 2 p.

NAVARRO, I. (1996) Estudios hidrogeológicos de la Loma Los Pozos durante la fase inicial de llenado de la Presa El Cuchillo - Solidaridad, China, Nuevo León, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. 145 p + anexos.

NIWAS, S. y SINGHAL, D.C. (1985) Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data. J. Hydrol., 82, 143 – 153.

OGILVY, R.D., CUADRA, A., JACKSON, P.D. y CUELLAR, V (1991) Delineation of a resistive drainage channel by EM conductivity survey. *Geoexploration*. 28, 139 – 152.

ORELLANA, E. (1982) *Prospección geoelectrica en corriente continua*, 2ª edición. Ed. Paraninfo, Madrid. 578 p.

PRADO-GÓMEZ, J. (1997) *Aplicación de métodos geofísicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises – Linares, Nuevo León, México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 96 pp + anexos.

QUARTO, R. y SHIAVONE, D. (1994) Hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from electrical prospecting data from the Apulian carbonate platform. *J. Hydrol.*, 154, 219 – 244.

RAGAN, D.M. (1980) *Geología Estructural*. Editorial Omega, Barcelona, 207 p.

RODRÍGUEZ-LOZANO, D. (1976) *Bioestratigrafía de la franja Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de Burgos*, Memorias III Symposium de geología del subsuelo. *Petróleos Mexicanos*, Zona Noreste 241 – 253 p.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SARH (1979) *Informe geológico del proyecto "El Cuchillo" sobre el Río San Juan, Municipio de China, Estado de Nuevo León*. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Reporte interno, 70 p.

SCHLUMBERGER (1984) *Evaluación de formaciones en México*. 1ª Ed. Francia. 325 p.

SCHOELLER, H. (1954) *La classification géochimique des eaux*. IASH. General Assembly of Berkeley, publ. 64, 16 - 24.

SPP (1981) *Geología de la República Mexicana*. Secretaría de Programación y Presupuesto, México. 82 p.

STEINICH, B., SIMÓN, I., ANDRÉS-CHAVARRÍA, J. y MARÍN, L. E. (1997) Geophysical investigations of the vadose zone in the Valley of Hermosillo aquifer., Sonora, Mexico. Geof. Int., 36, 191 – 200.

TORRES-HERRERA, F. (1987) Obras hidráulicas, 2ª edición, Editorial LIMUSA, México, 294 p.

UANL-UEM (1993a) Estudios geofísicos en la Loma Los Pozos, Presa El Cuchillo. Informe Técnico. 40 p y anexos.

UANL-UEM (1993b) Investigaciones Ingeniero - geológicas y geofísicas en el área de la Presa El Cuchillo. Informe Técnico. 41 p y anexos.

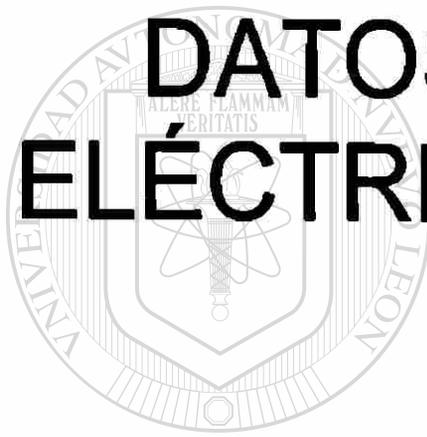
VELDE, B. (1992) Introduction to clay minerals. 1ª edición. Editorial Chapman & Hall. Gran Bretaña. 356 p.

WERNER, J. (1996) Introducción a la Hidrogeología. Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L., 1ª edición, 174 p.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ANEXO A

DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES



UANL

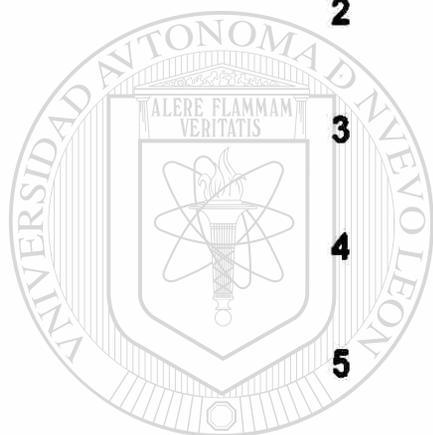
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA A1
UBICACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES
A LO LARGO DEL DIQUE.

SONDEO	UBICACIÓN	SONDEO	UBICACIÓN
0	25° 43' 37" N 99° 17' 26" W	6	25° 43' 34" N 99° 19' 30" W
1	25° 43' 37" N 99° 17' 34" W	7	25° 43' 52" N 99° 20' 11" W
2	25° 43' 38" N 99° 17' 56" W	8	25° 43' 36" N 99° 19' 49" W
3	25° 43' 36" N 99° 18' 26" W	9	25° 43' 35" N 99° 19' 01" W
4	25° 43' 35" N 99° 18' 59" W	10	25° 43' 36" N 99° 18' 37" W
5	25° 43' 35" N 99° 19' 13" W		



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TABLA A2
UBICACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES
A LO LARGO DE LA CORTINA.

SONDEO	UBICACION	SONDEO	UBICACIÓN
1	25° 41' 17" N 99° 15' 58" W	4	25° 42' 55" N 99° 16' 42" W
2	25° 41' 44" N 99° 16' 10" W	5	25° 43' 11" N 99° 16' 48" W
3	25° 42' 10" N 99° 16' 21" W		

TABLA A3
DATOS DE SEV's EN EL DIQUE PARA EL AÑO 1992.

AB/2	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
1.5	7.5	9.9	5.8	4.8	5.5	5.8	17.0	17.0	17.0	55.0	7.5
2	8	9.0	5.8	5.2	6.0	6.2	19.0	20.0	22.0	65.0	10.0
3	6.5	9.0	5.8	6.5	8.2	6.5	22.0	25.0	28.0	65.0	12.0
4	5	10.0	5.8	7.5	15.0	7.5	24.0	35.0	34.0	48.0	15.0
5	4.2	9.0	5.8	8.8	15.0	8.5	26.0	41.0	42.0	45.0	18.0
7.5	4	7.5	5.8	9.0	18.0	7.0	30.0	45.0	42.0	31.0	20.0
10	4	6.5	5.8	9.9	13.0	9.0	33.0	40.0	42.0	26.0	25.0
15	4.2	6.5	5.8	10.0	14.0	9.0	40.0	35.0	45.0	18.0	28.0
20	4.8	6.5	5.8	11.0	14.0	12.0	45.0	28.0	30.0	19.0	28.0
30	6.1	6.0	5.8	12.0	13.0	12.0	40.0	23.0	26.0	20.0	26.0
40	6.8	5.5	5.8	13.0	10.0	13.0	27.0	20.0	24.0	20.0	27.0
50	9.2	5.2	5.8	11.0	9.0	12.0	22.0	17.0	24.0	20.0	27.0
75	11	6.0	7.0	9.6	8.5	11.0	19.0	12.0	24.0	18.5	28.0
100	19	6.5	9.0	9.0	8.0	10.0	18.0	10.0	25.0	15.0	25.0
150		8.0							27.0	18.0	19.0
200		8.0								21.0	18.0

TABLA A4
DATOS DE SEV's EN EL DIQUE PARA EL AÑO 1995.

AB/2	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
1.5	124.6	5.4	31.0	7.8	15.8	18.0	27.4	10.0	84.2	47.0	66.9
2.2	85.6	4.4	28.6	5.4	16.8	13.8	20.4	10.2	82.3	43.7	49.4
3	67.9	5.1	26.8	4.7	16.4	14.7	18.3	10.8	73.4	33.3	36.2
5		5.0	16.4	3.8	13.4	11.4	12.9	12.5	56.2	23.8	23.1
7.5	25.2	7.1	10.3	3.8	12.9	10.4	11.1	15.1	47.6	20.2	15.7
10	20.0	5.6	7.8	4.5	12.1	11.9	8.9	17.3	40.2	17.9	11.3
15	14.5	6.7	6.3	5.1	11.7	10.7	8.5	18.4	31.2	15.7	9.8
22	9.8	7.3	6.0	6.3	9.9	10.6	7.4	21.7	25.4	13.9	7.7
30	7.6	7.3	5.4	7.0	9.9	9.7	9.9	19.3	20.9	11.9	7.6
50	9.9	5.9	5.7	7.0	9.5	9.5	13.6	13.1	18.6	12.6	9.7
75	10.6	5.2	6.0	5.8	9.4	9.6	14.9	11.7	16.4	14.5	10.8
100	12.7	5.7	6.8	4.9	8.5	10.7	14.3	12.9	18.6	14.8	13.8
150	13.8	6.3	7.9	4.9	8.4	9.1	14.1	12.0	18.0	13.6	14.0
220		7.5	8.0								14.4

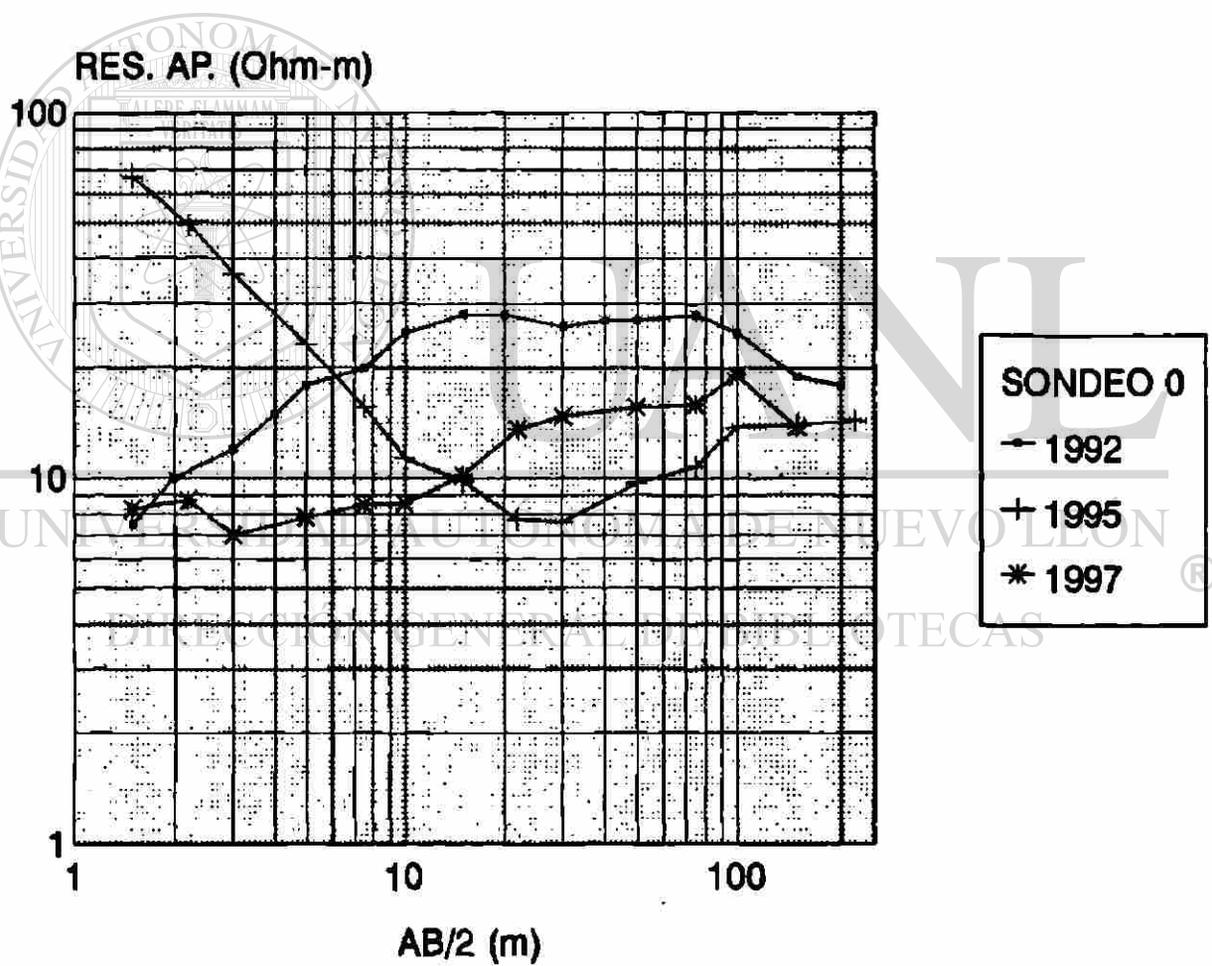
TABLA A5
DATOS DE SEV's EN EL DIQUE PARA EL AÑO 1997.

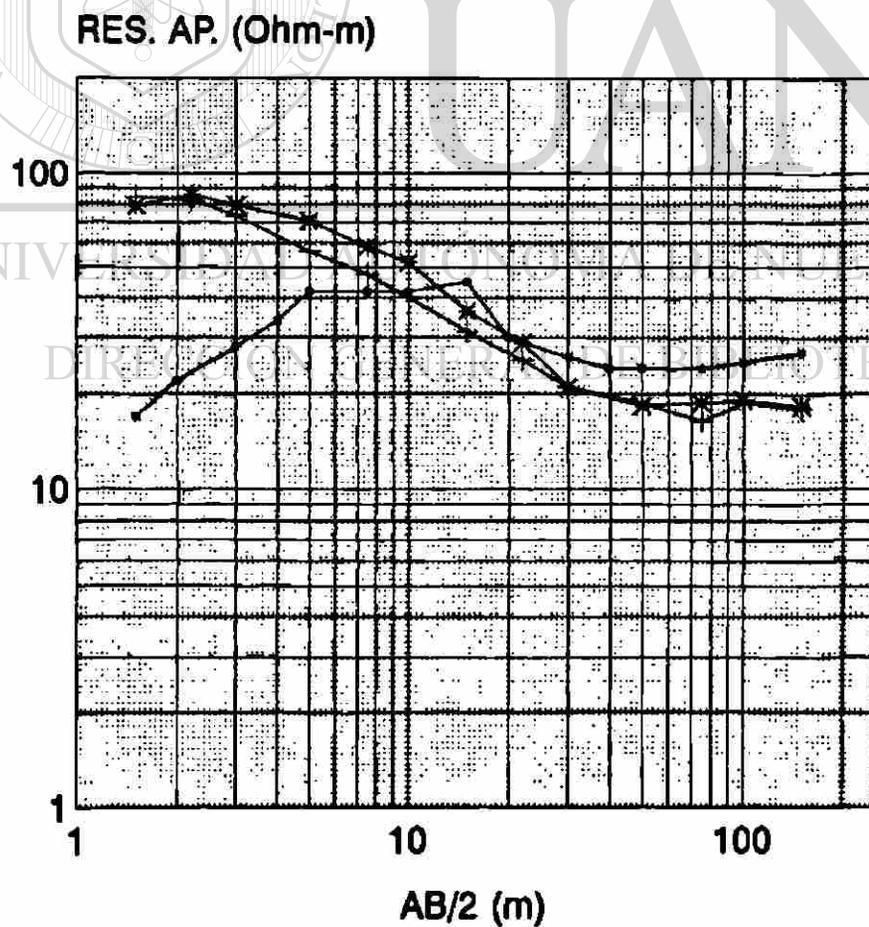
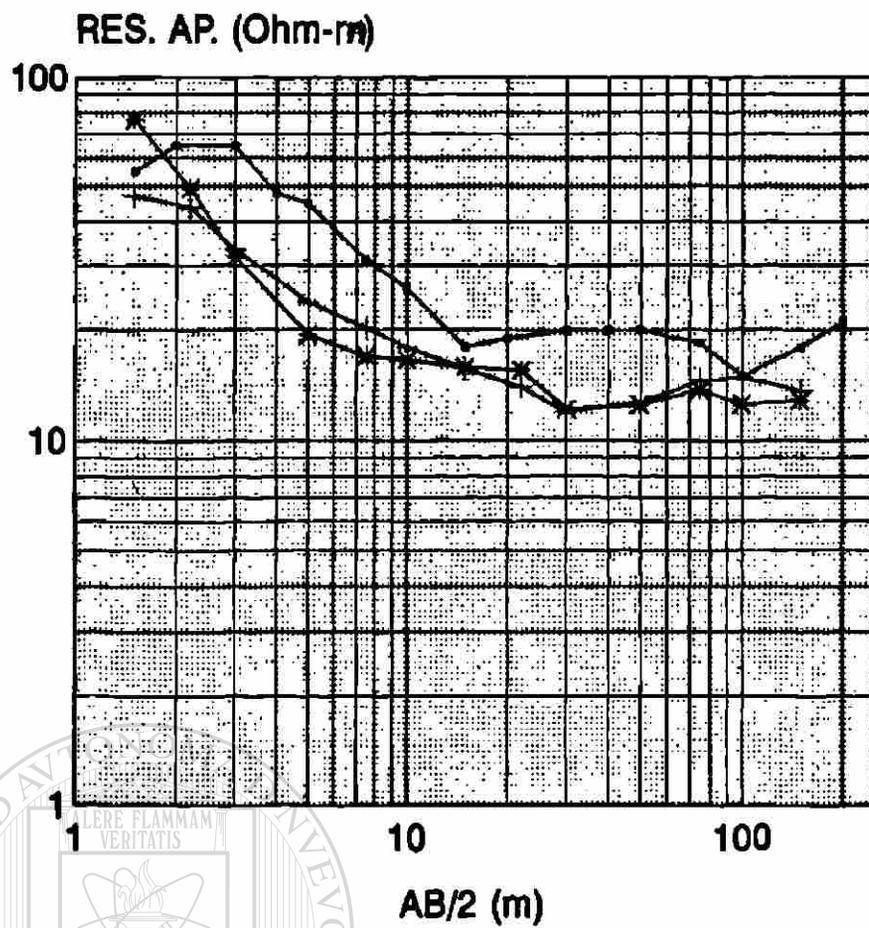
AB/2	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
1.5	79.9	21.6	48.8	22.0	49.2	59.4	28.3	20.5	78.8	76.5	8.2
2.2	67.6	12.1	40.4	14.5	41.1	50.8	25.2	14.3	85.5	49.2	8.7
3	59.3	9.1	32.7	12.2	41.9	55.4	24.5	9.9	79.1	31.6	7.0
5	33.1	7.6	16.1	10.3	30.6	44.1	15.9	7.2	70.5	19.4	7.8
7.5	18.2	6.3	13.4	8.9	21.6	34.3	14.4	7.2	58.2	17.0	8.4
10	16.1	7.1	10.9	8.8	18.5	30.2	11.2	8.7	51.8	16.6	8.5
15	11.9	7.5	9.4	7.6	12.9	22.1	10.2	11.2	36.3	15.9	10.1
22	8.2	6.0	7.9	6.4	11.0	17.6	8.9	14.4	28.8	15.6	13.6
30	7.4	4.8	7.0	6.1	9.5	13.0	8.2	15.7	21.0	12.1	14.8
50		6.3	6.9	8.0	9.5	10.1	10.2	13.1	18.3	12.5	15.7
75	8.7	6.6	8.8	9.0	9.9	9.3	11.7	10.5	18.7	13.7	16.0
100	10	6.1	7.7	7.2	10.2	9.9	12.4	10.8	19.1	12.5	19.1
150	11.5	7.0	8.7	5.9	9.7	8.9	12.7	10.0	18.3	12.8	13.7

TABLA A6
DATOS DE SEV REALIZADOS A LO LARGO DE LA CORTINA DE
LA PRESA EL CUCHILLO EN ABRIL DE 1995.

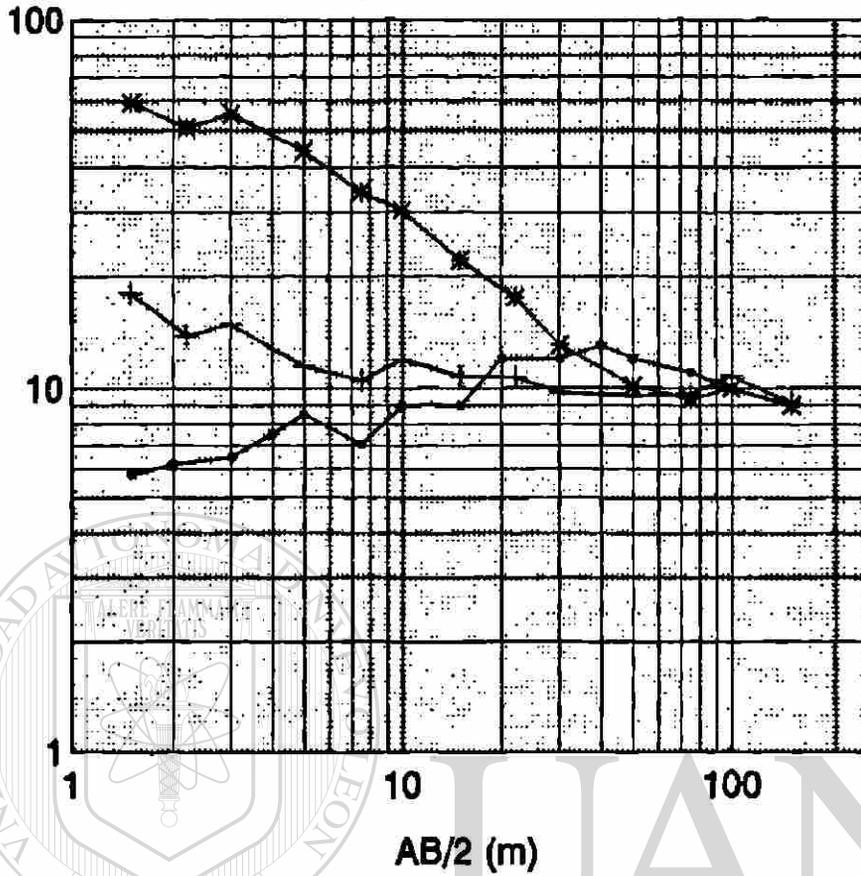
AB/2	MN/2	COR-1	COR-2	COR-3	COR-4	COR-5
1.5	0.5	45.60	60.44	122.95	38.29	69.48
2.2	0.5	48.80	45.01	68.45	26.69	73.19
3.0	0.5	33.19	26.74	46.10	24.44	79.85
5.0	0.5	19.21	24.23	38.70	13.67	64.42
7.5	0.5	8.90	20.55	30.16	15.76	49.08
10.0	0.5	6.01	17.00	26.13	18.89	41.48
15.0	0.5	5.92	12.74	19.31	24.04	35.30
15.0	5.0	6.30	13.05	23.78	21.99	35.48
22.0	5.0	6.89	10.84	22.60	28.30	34.89
22.0	0.5	6.85	11.41	19.08	29.26	35.32
30.0	5.0	7.62	12.12	23.12	28.26	33.43
50.0	5.0	9.52	16.43	26.17	26.86	29.64
75.0	5.0	12.18	21.19	27.78	25.98	24.88
100.0	5.0	13.88	18.66	26.60	24.87	22.32
150.0	5.0	15.74	20.59	23.22	20.65	22.32

**CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE PARA LOS SONDEOS
CERO AL DIEZ, A LO LARGO DEL DIQUE, EN LAS DIFERENTES
CAMPAÑAS.**





RES. AP. (Ohm-m)



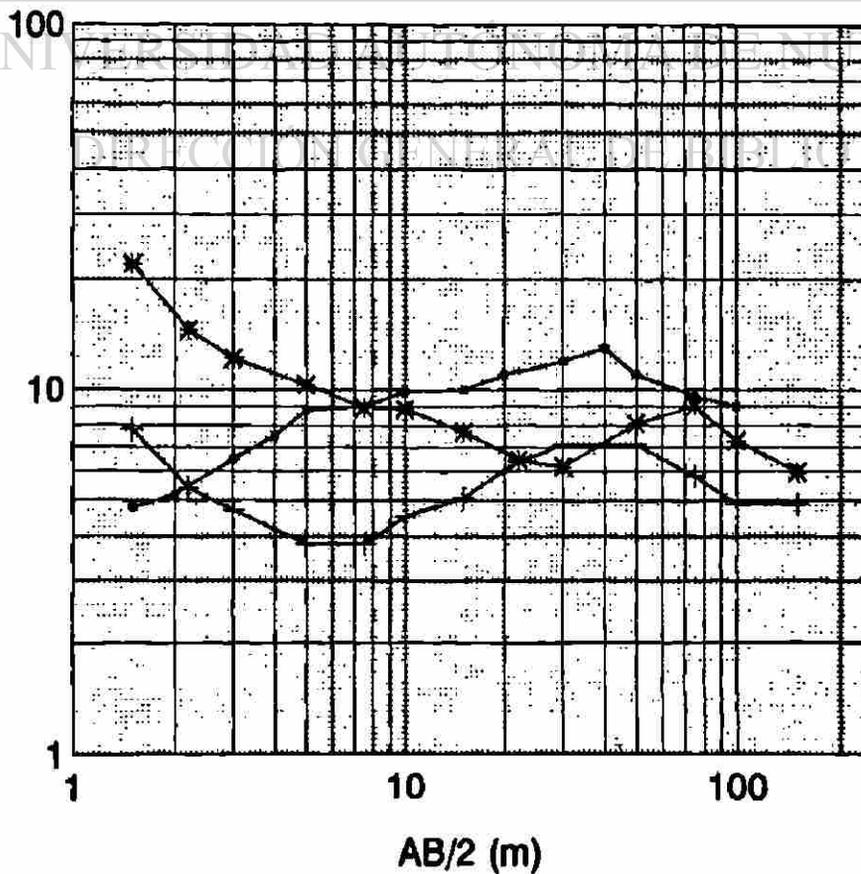
SONDEO 4

→ 1992

+ 1995

* 1997

RES. AP. (Ohm-m)



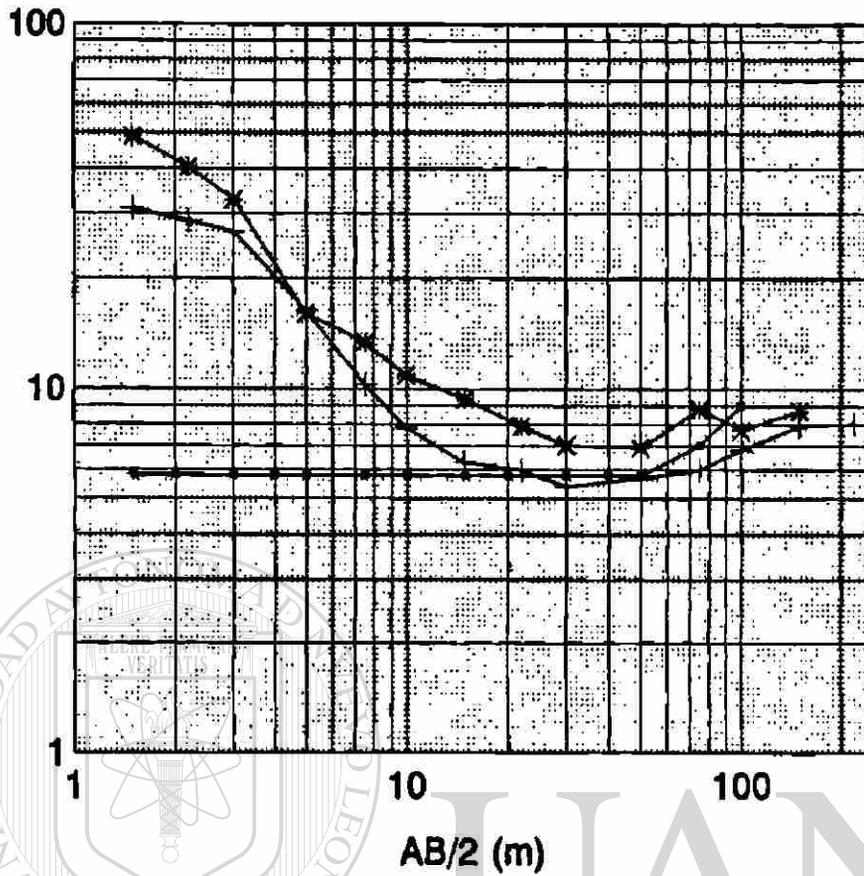
SONDEO 5

→ 1992

+ 1995

* 1997

RES. AP. (Ohm-m)



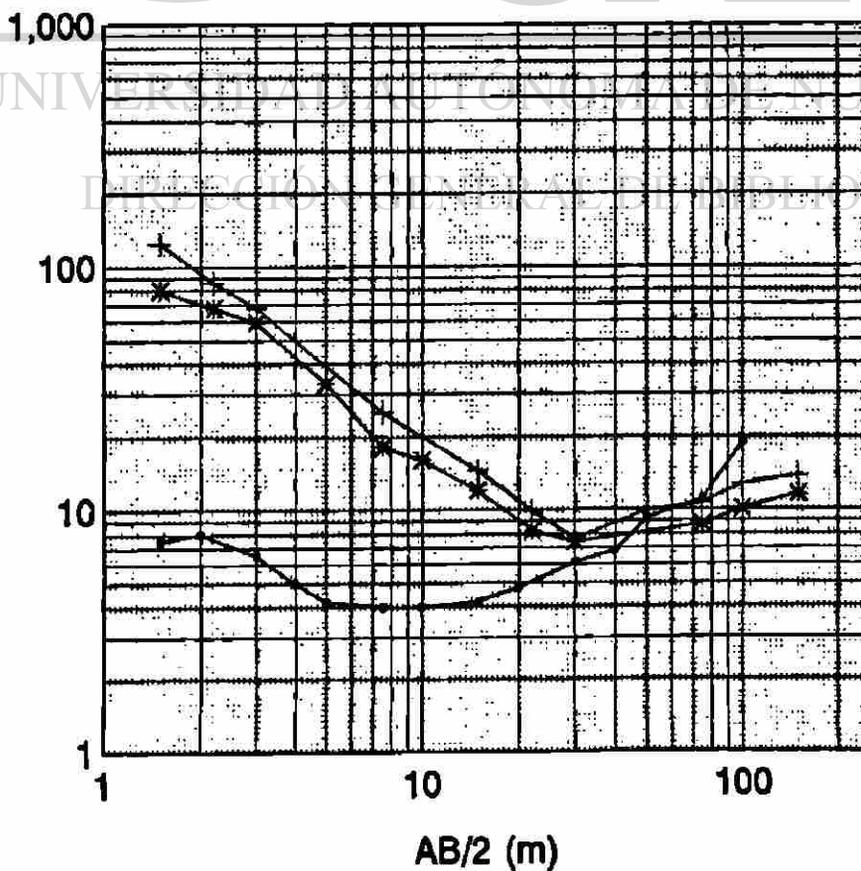
SONDEO 6

— 1992

+ 1995

* 1997

RES. AP. (Ohm-m)



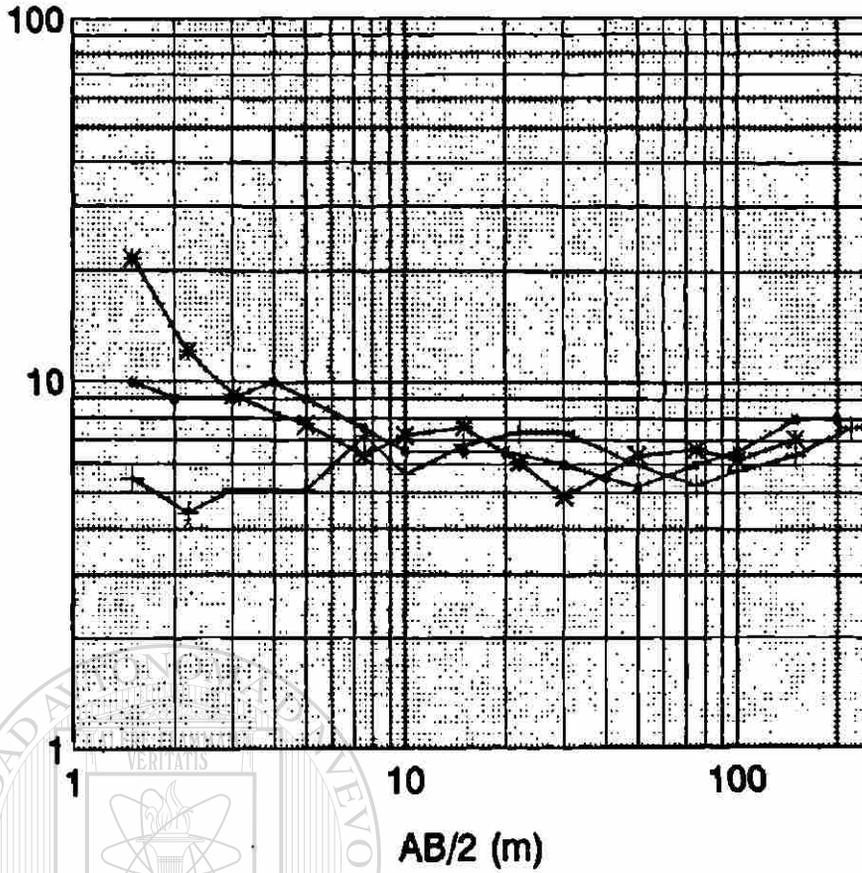
SONDEO 7

— 1992

+ 1995

* 1997

RES. AP. (Ohm-m)



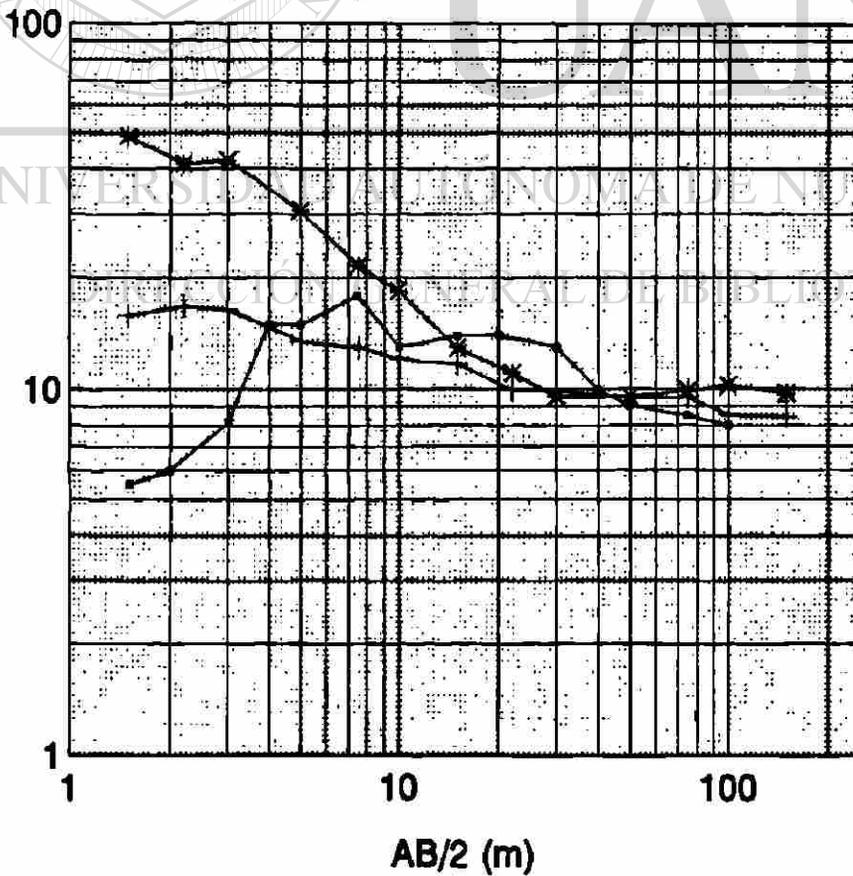
SONDEO 8

— 1992

+ 1995

* 1997

RES. AP. (Ohm-m)

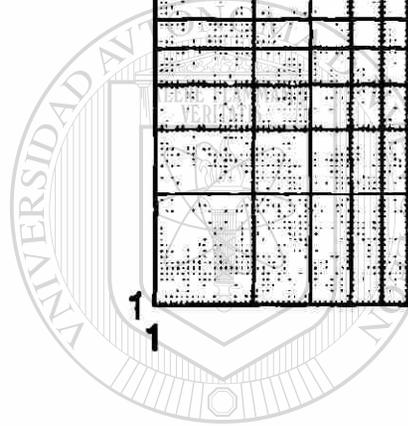
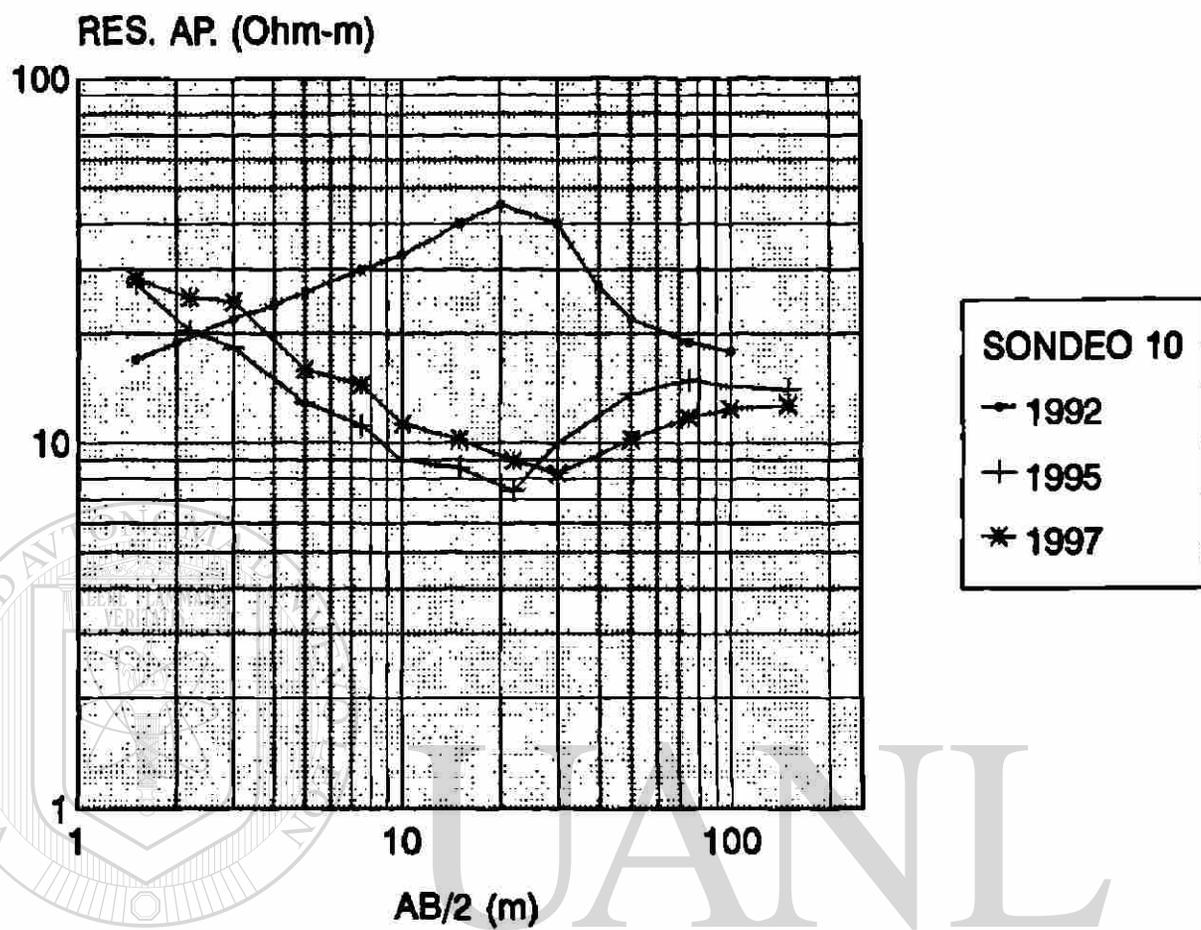


SONDEO 9

— 1992

+ 1995

* 1997



DANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

