

26



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS
Y DE INYECCIÓN REALIZADOS DURANTE LA
CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA EL GALLO, GRO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O G E O L O G O

PRESENTA

MARTHA ADRIANA VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

298730

DIRECTOR DE TESIS:

ING. SERGIO HERRERA CASTAÑEDA



MÉXICO, D.F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**COMISION NACIONAL
DEL AGUA**

**EL PRESENTE TRABAJO SE IMPRIMIÓ CON EL APOYO DE
LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1539

SRITA. MARTHA ADRIANA VAZQUEZ HERNANDEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Sergio Herrera Castañeda y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

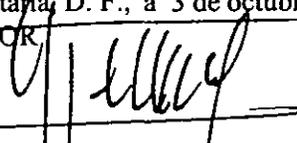
**ESTUDIOS GEOLOGICOS, GEOTECNICOS Y DE INYECCION REALIZADOS DURANTE
LA CONSTRUCCION DE LA PRESA EL GALLO, GRO.**

- INTRODUCCION
- I ANTECEDENTES
- II GEOLOGIA
- III PROPIEDADES MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO
- IV TRATAMIENTOS DE CIMENTACION
- V PROYECTO DE INSTRUMENTACION
- VI CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA
- ANEXOS

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

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 3 de octubre de 2001
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg
PP

DEDICATORIA

A Bertha y Amado, por darme la vida y motivarme a tener una formación universitaria

A mis hermanos Dora Luz, Fermín y Alma Isis, por ser el soporte de mi vida y estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas

A mis sobrinas, Fernanda, Monserrat, Itzi, Alondra y Regina, por recordarme que la vida es bella y puede estar llena de sorpresas.

A Magali Ventura y Arturo Correa, por brindarme su amistad y apoyo.

A mis amigos Gabriel Vázquez, Elsa Zavala, Carmen Rosas, Melibea González, Jorge Hernández, Elia Escobar, Carlos Ortega y Enrique Viloria por compartir conmigo durante todos estos años cariño, amistad, tristezas, alegrías, consejos y regaños, sin los cuales no hubiera podido concluir esta etapa del camino.

A mis amigos Fernando Trujillo, Fabiola Rodiles e Israel García por apoyarme de manera incondicional durante la realización de éste trabajo.

A todos mis compañeros del CHFI por mostrarme otra cara de nuestra Universidad, de nuestra sociedad y de nuestro país, especialmente a José G. Corona, Adrian Rangel, Miguel A. Vázquez, Juan López, Gerardo Cortes, Raúl Teje y Hector Rodríguez.

A Isidro Velázquez por encender esta nueva luz en mi vida.

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

*A todos los profesores y trabajadores que me apoyaron durante mi estancia
en la Facultad de Ingeniería.*

*Al Ing. Sergio Herrera Castañeda
por haber dedicado tiempo e interés en la realización de este trabajo.*

A mis Sinodales

*M.en C. Rolando de la Llata
Ing. Jorge Nieto Obregón
M.en C. Gilberto Silva Romo
Ing. Emiliano Campos Madrigal*

A la Comisión Nacional del Agua

*Quien por medio del Dr. Alberto Jaime P. Director de la Subdirección
General Técnica, brindó el apoyo y las facilidades necesarias para la
realización de este trabajo.*

*De una manera muy especial a todo el personal que labora en la Gerencia
del Consultivo Técnico.*

Al Ing. Ulrich Hungsberg Engelmann

*Por todas sus enseñanzas, su paciencia, tiempo y ayuda; que me brindó
durante mi estancia en la Subgerencia de Geología y Geohidrología.*

*A los ingenieros: Paul Alfaro Nava, Jesús García, Macario Vega y Fernando
Aguilar*

*Al personal administrativo: Teresa Gutiérrez, Rosalva Manjarrez, Antonio
Garduño, Luis Miguel Sánchez, Miguel Angel Trejo, María E. Cervantes,
Elizabeth Alejandre, Lourdes Meneses, Olga Luna, Jesús Mascott*

A la Comisión Federal de Electricidad

en especial al

Ing. Francisco Moreno Castillo por su interés y atención

*Al M. en C. Jorge Roldán Osegueda
por el tiempo y la información otorgados*

ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS Y DE INYECCIÓN REALIZADOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA EL GALLO, GRO.

INDICE:

RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN.	ii
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Objetivos del trabajo.	1
1.2 Generalidades	1
1.2.1 Localización	1
1.2.2 Fisiografía	3
1.2.3 Hidrografía	4
1.3 Objetivos de la obra	5
1.4 Descripción de la obra	6
1.5 Historia de la construcción	9
2. GEOLOGÍA.	11
2.1 Geología Regional	12
2.1.1 Estratigrafía	12
2.1.2 Geología Estructural	16
2.1.3 Geología Histórica	18
2.2 Geología del Vaso	21
2.3 Geología de la Boquilla	22
3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO	26
3.1 Primeras exploraciones 1979. C.I.E.P.S.	27
3.1.1 Porcentaje de recuperación	27
3.1.2 Índice de calidad de roca (RQD)	27
3.1.3 Pruebas de absorción de agua	28
3.1.4 Comentarios adicionales	29
3.2 Exploraciones posteriores 1992-1995. C.F.E.	30
3.2.1 Estudios geofísicos	30
3.2.2 Sistema de discontinuidades	31
3.2.3 Índice de calidad de roca (RQD)	32
3.2.4 Pruebas de absorción de agua	34
3.3 Campaña 1997. C.N.A – C.F.E.	35
3.3.1 Opinión de consultores externos	35
3.3.2 Análisis del autor	37
3.4 Caracterización del macizo rocoso	38

4. TRATAMIENTOS DE CIMENTACIÓN.	40
4.1 Tratamientos de cimentación realizados en la presa “El Gallo”	40
4.2 Tapete de consolidación	41
4.3 Pantalla impermeable	42
4.3.1 Línea “F” (Línea central)	43
4.3.2 Línea “E”	44
4.3.3 Línea “G”	45
4.4 Barrenos de verificación y de investigación	46
5. PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN.	50
5.1 Primera etapa	50
5.2 Segunda etapa	51
5.3 Resultados de las mediciones	53
6. CONCLUSIONES.	55
7 BIBLIOGRAFÍA.	57
8 ANEXOS.	
ANEXO I. PLANOS	
ANEXO II. BARRENOS DE EXPLORACIÓN	
ANEXO III. MEMORIA FOTOGRÁFICA.	

RESUMEN

En este trabajo se recopilaron los estudios y trabajos geológicos y geotécnicos disponibles, realizados durante la construcción de la presa de almacenamiento “El Gallo”, ubicada en el estado de Guerrero; en el se hace una descripción de las unidades litológicas que conforman la geología regional y de la boquilla, la cual está representada por las Formaciones Balsas y la Serie Volcánica Characharando, afectados por un cuerpo intrusivo hipabisal y por diques de composición andesítica.

Se presentan los resultados obtenidos de porcentajes de recuperación y RQD de los núcleos recuperados, así como también de las pruebas de absorción de agua de tipo Lugeon que fueron realizadas durante las diferentes etapas de exploración y de las cuales la autora realizó una nueva interpretación obteniendo los valores de absorción inicial y presión crítica de las rocas que conforman la boquilla. Una conclusión indica que la absorción inicial de las rocas es baja, y que sus presiones críticas son menores a 10 kg/cm^2 , por lo cual las altas permeabilidades reportadas son producto del hidrofracturamiento de la roca.

Otra conclusión nos marca que la permeabilidad de la roca no implica la inyectabilidad de la misma. Esto se demostró con los resultados obtenidos en los barrenos de investigación, en los que se comprobó que las rocas de la Formación Balsas son permeables, sin embargo, los consumos reportados de lechada van de bajos a moderadamente bajos; confirmando así que la permeabilidad residual existente se debe a fisuras muy finas que no son inyectables con las técnicas utilizadas.

Finalmente analizando las lecturas piezométricas registradas desde el inicio del primer llenado del embalse, hasta enero del 2000, se observa que el funcionamiento de la presa es adecuado a pesar de la permeabilidad residual y la subpresión existente en el cuerpo de la cortina y en la cimentación de la misma

INTRODUCCIÓN.

No cabe duda de la trascendencia del agua para el sustento de los seres vivos y el desarrollo de las actividades humanas; dichas actividades quedan restringidas por la distribución geográfica del agua en nuestro país, existiendo así zonas que sufren la constante escasez de este elemento con todas las consecuencias que esto arrastra, pérdida de cosechas, enfermedades, muerte del ganado, etc. De aquí nace la necesidad del hombre de almacenar el agua durante las épocas de lluvia y así poder aprovecharla en épocas de estiaje.

Por ello es de gran importancia el buen aprovechamiento de los recursos hidráulicos, para poder sustentar las diversas actividades del hombre. En este ámbito las presas de almacenamiento cumplen una función especial, siendo utilizadas no solo para el control de avenidas, sino también como fuentes de suministro de agua potable, generación de energía eléctrica y riego agrícola.

Previo a la construcción de una presa es necesario el estudio geológico completo tanto regional como de detalle, que permita definir las unidades litológicas que conforman la boquilla y el vaso, además de las características estructurales y de permeabilidad de las rocas.

Dependiendo de las características geológicas del sitio y del tipo de la cortina que se construirá, se determina el tratamiento de la cimentación; el objetivo de dicho tratamiento es el de lograr una superficie de apoyo estable y de baja deformabilidad, con objeto de poder garantizar el seguro funcionamiento de la obra. Éste tratamiento debe incluir también los procedimientos necesarios para reducir el flujo de agua debajo de la cortina, entre los que se encuentra el inyectado de la pantalla.

Para la planeación del tratamiento de inyección, también es necesario tomar en cuenta el tipo de uso que se le dará a la obra, así como su volumen de almacenamiento, para conocer hasta que grado es posible aceptar pérdidas por filtraciones esto es, una permeabilidad tolerable, que no influya en el funcionamiento y estructura de la obra.

Como ejemplo se presenta el caso de la construcción de la presa de almacenamiento “El Gallo”, ésta se planeó debido a las grandes pérdidas económicas en la región de Tierra Caliente provocadas por la constante escasez de agua para riego que por décadas enfrentaban los productores agrícolas de la zona límite entre los Estados de Guerrero y Michoacán en el valle que ocupa el Río Cutzamala , aunado a las derivaciones, de agua del sistema Cutzamala para agua potable de la Ciudad de México.

Algunos de los problemas surgidos durante la construcción de la presa, se debieron a las constantes interrupciones que se realizaron en el desarrollo de esta obra, dichas suspensiones se debieron principalmente a lomitaciones presupuestales.

Como algunas de estas suspensiones de trabajos llegaban a abarcar uno o dos años, la pérdida de control en los trabajos y el deterioro de los materiales colocados era inherente. Por ello, más adelante, al retomarse los trabajos en 1997, surgieron algunas diferencias en las interpretaciones acerca del grado de permeabilidad de las rocas, ya que los diferentes análisis de los resultados obtenidos en la recuperación de núcleos y en las pruebas de absorción de agua a alta o baja presión, produjo una gran incertidumbre respecto a la efectividad del tratamiento de la cimentación realizado por la CNA.

En este trabajo se presenta las conclusiones surgidas a partir del estudio de estas interpretaciones, además de los trabajos realizados posteriormente y los resultados observados a la fecha.

CAPÍTULO 1. **ANTECEDENTES**

1.1 Objetivos del trabajo.

El objetivo del presente trabajo es recopilar e integrar los estudios geológicos y geotécnicos realizados para la construcción de la presa de almacenamiento “El Gallo”.

Con base en las características geológicas reportadas en el sitio se mencionarán cuales fueron los tratamientos realizados a la cimentación, las discrepancias surgidas por las diferencias en la interpretación de los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad y la manera en que se resolvieron.

Tomando en cuenta cuales son los principales factores que influyen en el comportamiento de la cortina y su cimentación señalar el fue el proyecto de instrumentación instalado en la obra y cuales han sido los resultados obtenidos en las lecturas de éstos.

Con base en esto verificar la efectividad de los tratamientos realizados al terreno y confirmar si los trabajos para la reducción de la permeabilidad de la roca , mediante la inyección de lechada de cemento, evitaron filtraciones en la zona de cimentación y si la pantalla de inyectado cumplió con su función.

Todo esto servirá para mostrar las nuevas metodologías que hay para interpretar las pruebas de absorción de agua y comprobar el buen funcionamiento de la presa a pesar de la permeabilidad residual registrada.

1.2 Generalidades.

1.2.1 Localización.

El Proyecto se localiza en la porción NNW del Estado de Guerrero, cerca de su límite con los estados de Michoacán y de México, a 12 Km del poblado de Zacapuato (Fig. 1) Geográficamente está situada en el paralelo 18°42'06" de latitud norte y a los 100° 40'12 " de longitud oeste del Meridiano de Greenwich

La boquilla de la presa se encuentra ubicada en el cauce del Río Cutzamala, entre los cerros El Gallo y La Cacamicua, a 17 Km aguas arriba en línea recta de la presa derivadora Hermenegildo Galeana.

El embalse se llega hasta las cercanías del poblado de Tiquicheo, el cual se encuentra sobre la Carretera Federal No. 51 que va de Ciudad Altamirano, Gro. a Zitácuaro, Mich., y en otra ramificación sobre el Río Pungaracho llega a la altura de la rancharía del mismo nombre (Fig.1).

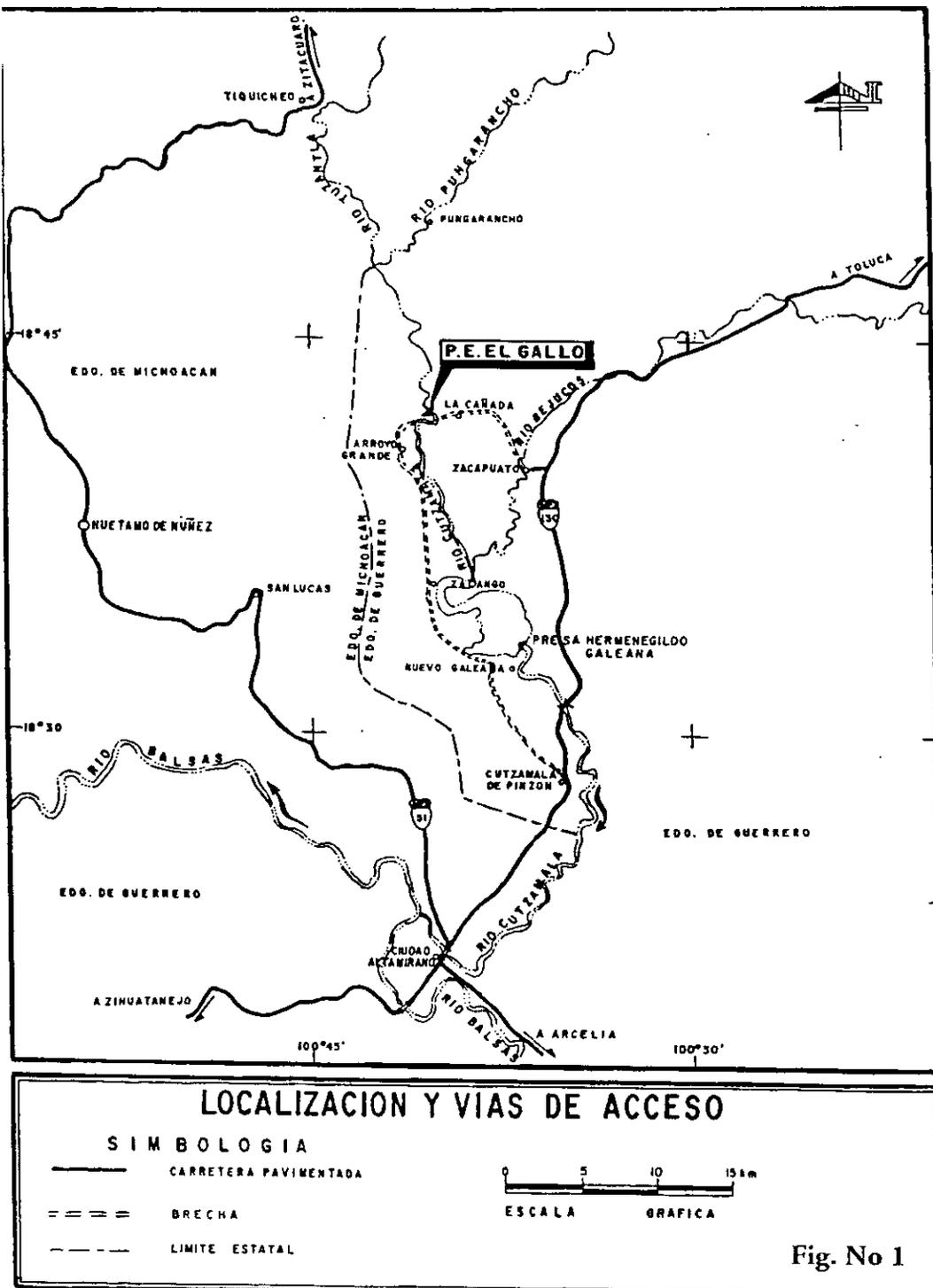


Fig. 1. Localización y Vías de Acceso

1.2.2 Fisiografía.

El área de la presa se encuentra situada dentro de la zona límite norte central de la subprovincia de la cuenca Balsas- Mexcala con la provincia del eje Neovolcánico, dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur en su parte norte (Raisz, 1964) (Fig. 2).

La provincia de la Sierra Madre del Sur, se caracteriza por poseer una estructura compleja, en cuyo basamento se tienen metasedimentos paleozoicos que están cubiertos localmente por capas marinas plegadas, depósitos continentales con una tendencia estructural casi horizontal de sus estratos y rocas volcánicas terciarias que cubren a la secuencia de rocas sedimentarias más antiguas, entre las que se observan algunas prominencias topográficas correspondientes a volcanes extintos.

La elevación promedio de la región es de 600 msnm, pero existen áreas que llegan a alcanzar hasta 1100 msnm. Se observa un contraste entre formas suaves y redondeadas distribuidas en valles orientados NNW- SSE y formas abruptas que conforman una sierra alargada que presenta la misma orientación y que separa a los dos valles. El origen de las diferencias fisiográficas es principalmente la heterogeneidad de la litología que conforma el terreno, así como los procesos tectónicos y exógenos que han actuado en la región.

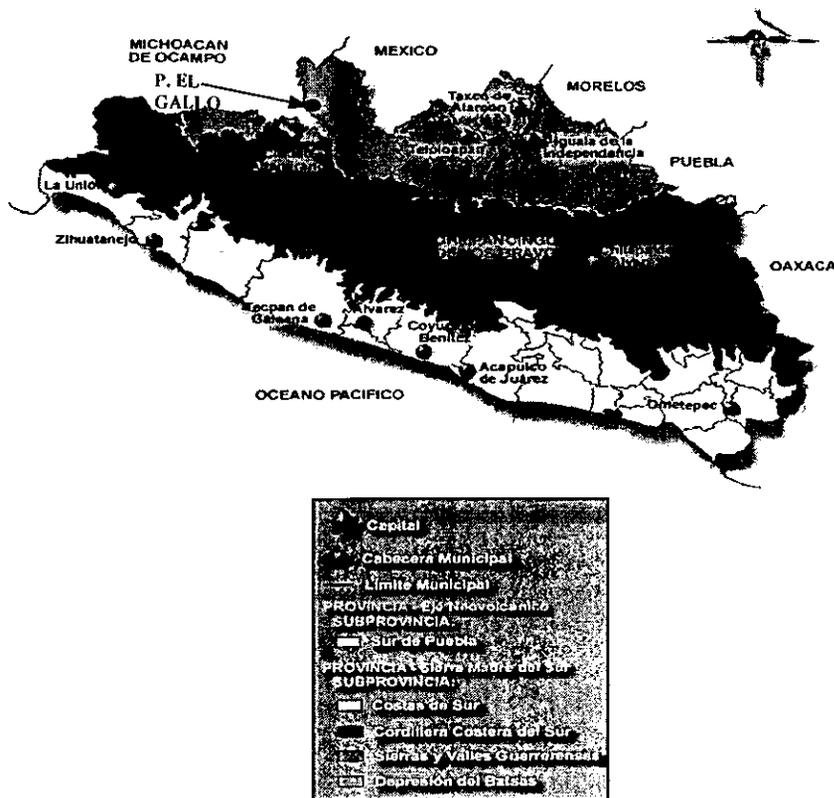


Fig. 2. Ubicación Fisiográfica de la Presa "El Gallo", Gro.
(Tomado de INEGI)

1.2.3 Hidrografía.

La zona se ubica dentro de la cuenca del río Balsas; el cual define el sistema hidrológico de la región y se comporta como el colector principal de todas las corrientes que conforman una red de drenaje superficial bien integrada, en la que se encuentra el río Cutzamala; este río corre en dirección hacia el sur, formando con sus tributarios una red de drenaje de tipo dentrítico en una cuenca exorreica, que a través del río Balsas, vierte sus aguas en el Océano Pacífico.

El río Cutzamala se origina de la unión del río Zitácuaro, que desciende del eje Volcánico en la vertiente occidental de la sierras de Angangueo y Zitácuaro en el estado de Michoacán, del Río Tilostoc que se origina en el Estado de México, a la altura de Valle de Bravo y del río Grande, que se deriva de la unión de los ríos Chino y Chinopo, provenientes de la ciudad de Morelia. El río Zitácuaro y el río Tilostoc cambian su nombre cerca de su confluencia a Tuzantla y Pungarancho respectivamente y sirven como límites naturales entre los estados de Michoacán y Guerrero (Fig. 3)

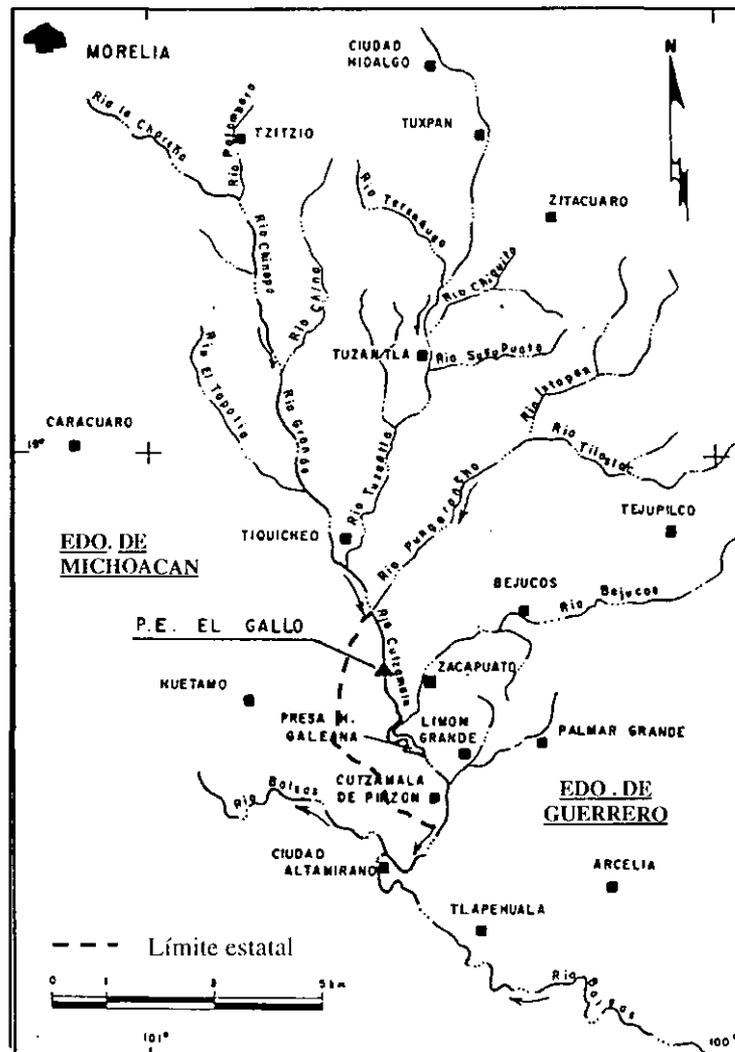


Fig. 3. Sistema hidrográfico en que se ubica el Río Cutzamala

1.3 Objetivos de la obra.

La Comisión Federal de Electricidad construyó en los años cuarenta varias presas en la cuenca alta del río Cutzamala para producción de energía. En vista de que la Ciudad de México y su zona metropolitana requieren cada vez un mayor suministro de agua potable, casi todas estas plantas suspendieron la generación de energía hidroeléctrica y el agua disponible se está conduciendo en un volumen de aproximadamente 15 m³/s mediante un bombeo de 1100 m, hacia la Ciudad de México. Esto provocaba una disminución en el caudal hacia aguas abajo y en épocas de estiaje una operación deficiente en la zona de riego.

Por lo tanto, se decidió construir la presa El Gallo, la cual se ha destinado para controlar los escurrimientos del Río Cutzamala y para el riego de 17 860 ha, de las cuales 11690 están en Guerrero y 6170 en Michoacán.

Actualmente una empresa privada pretende aprovechar la infraestructura de las obras de contención y de control de avenidas para equipar la presa con una planta generadora de energía eléctrica con capacidad de 30 MW.

1.4 Descripción de la obra.

La presa "El Gallo" se encuentra constituida por una cortina de materiales graduados, por un dique de los mismos materiales en su margen izquierda, por un vertedor de cresta libre en la margen derecha y por una obra de toma localizada a la derecha del vertedor. Esto se representa esquemáticamente en la figura 4 y a continuación se describen cada uno de estos elementos.

Cortina. Tiene una altura máxima de 67.5 m desde el desplante, la corona cuenta con un ancho de 10 m y una longitud de 490 m. La sección está formada por un corazón de material impermeable compactado con un ancho en la parte superior de 6 m a la elevación 368 msnm y taludes 0.2:1; filtros de grava-arena seleccionada con espesor de 6 m y respaldos de grava-arena a granel a terminar en un talud 1.7:1 en ambos paramentos, protegidos a su vez por enrocamiento y rezaga hasta completar el talud exterior de la cortina con 2:1; en razón del estrechamiento que sufre la sección en la parte alta se reducen los taludes del material impermeable y filtros hasta quedar a la elevación 373 msnm con un ancho de 6 m.

Durante la realización de las obras de desvío se construyó un sistema de tres ataguías, una paralela al cauce limitando el lado derecho del tajo mediante enrocamiento y dos transversales de materiales graduados, éstas forman parte del cuerpo de la cortina, la de aguas arriba a la elevación 325 msnm, con un ancho de corona de 10 m y la de aguas abajo con el mismo ancho de corona a la elevación 320 msnm. (Figura 5)

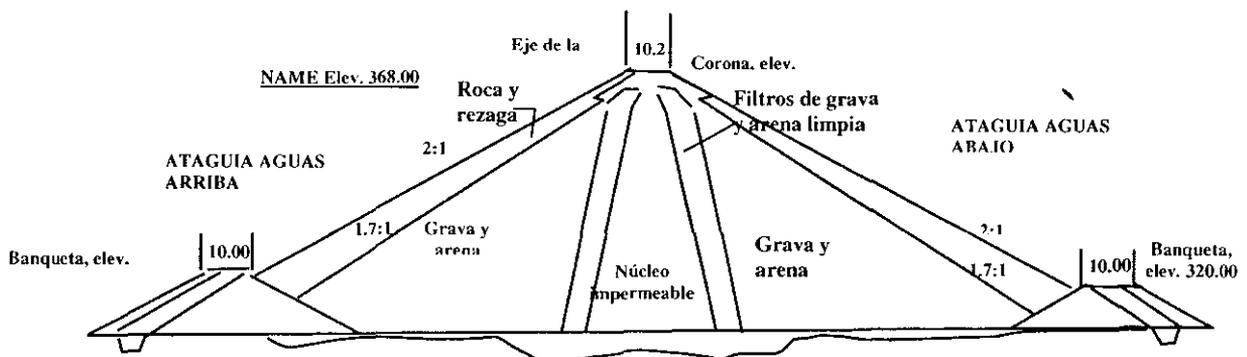


Fig. 5. Sección máxima de la cortina.¹

Dique. Se localiza en un puerto de erosión de la margen izquierda formado por el flanco oriental del cerro La Cacamicua y la porción suroccidental del cerro Blanco (Fig. 4). Es de materiales graduados y sección igual a la de la cortina; su altura máxima es de 28 m; la corona tiene un ancho de 10 m a la elevación 370.5 msnm y una longitud de 184 m. Al igual que la cortina el acabado de la corona fue dando elevaciones adicionales como contraflecha para prevenir asentamientos adicionales en el cuerpo del dique.

¹ Redibujado de. C.N.A Presas de México. Vol XVII. 1998.

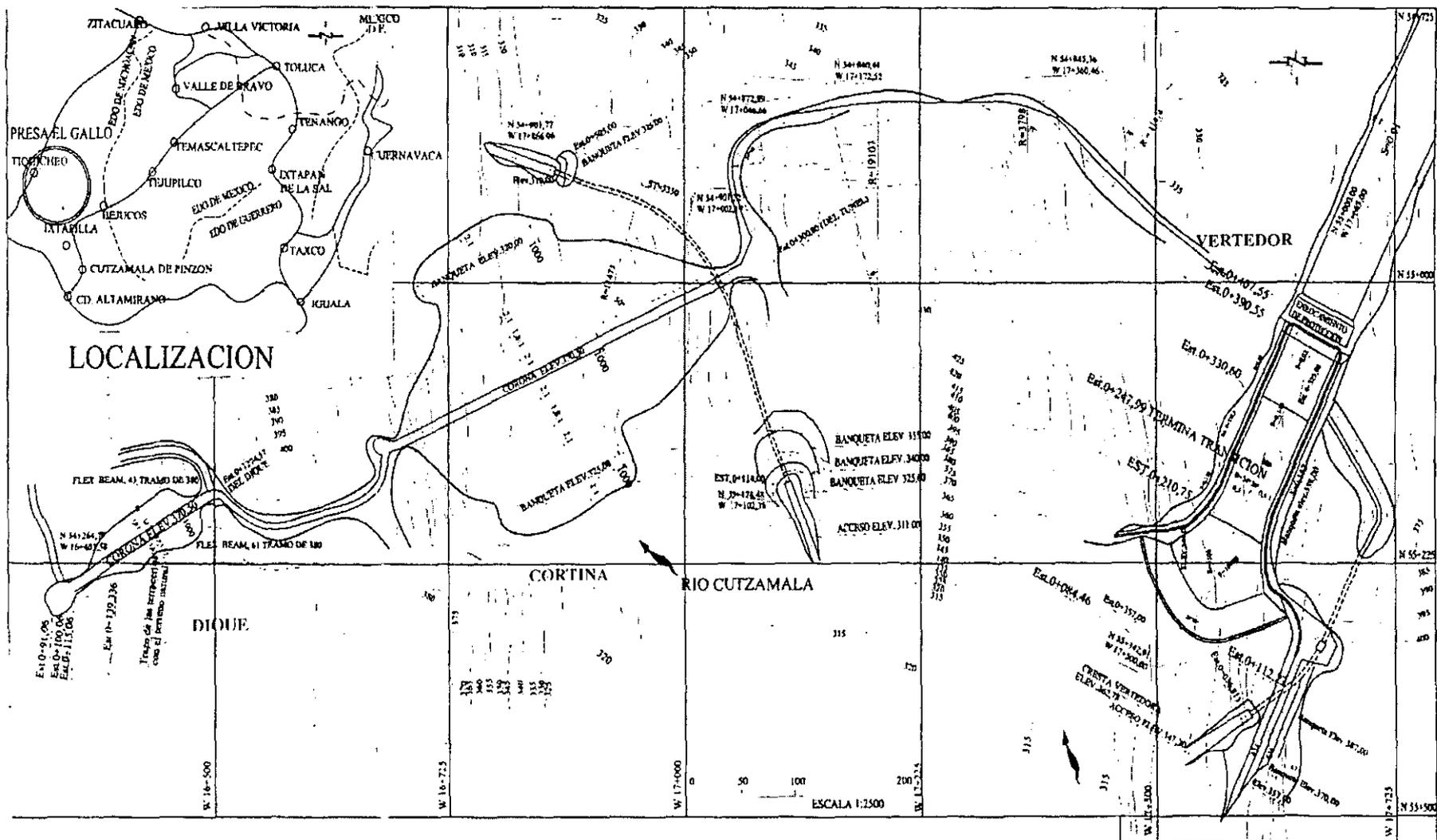


Fig. 4. Localización de obras.
Planta General

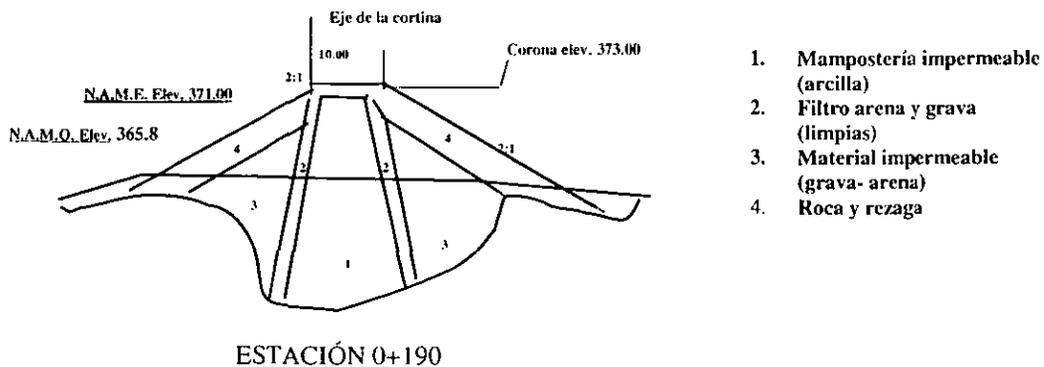


Fig. 6. Sección máxima del dique, obsérvese a un lado la lista de materiales que le componen.¹

Vertedor. Se localiza en la margen derecha, entre la parte norte del cerro El Gallo y al sur del cerro Los Pelillos, inmediatamente aguas arriba del eje de la cortina a la elevación 362.78 msnm (Fig. 4). La función del vertedor es la de desalojar los gastos en niveles superiores al nivel de aguas máximo ordinarias (NAMO) de avenidas de tal manera que se proteja la integridad estructural de la presa. Es un vertedor de cresta libre formado por una estructura de concreto reforzado, con un perfil tipo Creager en abanico, tiene una longitud de cresta de 200 m (Foto 1).

La estructura de concreto se inicia en la estación 0+122.22, donde el paramento del cimacio con un talud 1:1 y un espesor de 2 m cambia paulatinamente a horizontal a la elevación 344 msnm, en este tramo la sección es convergente formando un tanque amortiguador hasta la estación 0+210.75, donde la sección se estrecha para formar la estación de control, a partir de ésta se inicia la rápida con un ancho de 63 m (elevación 349.4 msnm) y sección trapezoidal, reduciendo el ancho de la plantilla a 50 m en la estación 0+250, ésta sección permanece constante hasta el final de la estructura en la estación 0+407.55, la longitud de este tramo es 192.3 m y con pendiente 0.145; la rápida está revestida de losas juntas cada 15 m, las losas laterales tienen una pendiente en la parte superior de 0.2168 y a partir de la estación 0+325.951, a la elevación 340.5 msnm, se vuelve horizontal; tanto en la plantilla como en los taludes las losas de la rápida están ancladas con dentellones.

Finalmente el gasto de diseño es de 4700 m³/s, los cuales pasan sobre la cresta con una carga de 5.22 m, dejando un bordo libre de 2.5 m.

¹ Redibujado de C.N.A. Presas de México. Vol. XVII. 1998.

Obra de Toma. Ésta se localiza a la derecha del vertedor (Fig. 4); está formada por cuatro partes de concreto reforzado: estructura de entrada, conducto en túnel, estructura de operación y estructura de salida.

Se inicia en un tajo a cielo abierto, con taludes 0.5:1 con un ancho de plantilla de 10 m hasta la estación 0+036.813, de ahí se inicia la parte estructural de la obra, la entrada está formada por dos módulos de rejillas inclinadas de acero estructural formadas por marcos de solera de 2.75 por 4.80 m (Foto 2), la longitud de esta estructura a cielo abierto es 10 m hasta la estación 0+046.813 donde se inicia la transición de sección rectangular a la sección portal del túnel revestido con un ancho de plantilla de 4 m y una altura de 3.58 m, el espesor del revestimiento es de 0.35 m (Foto 3); en el primer tramo hasta la estructura de compuertas tienen una longitud de 89.1 m con una pendiente de 0.01. La estructura de compuertas se encuentra entre las estaciones 0+141.6 y 0+163.2 Al final del túnel se inicia la estructura de salida formada por un canal de sección rectangular con un ancho de 4 m y forma una rápida parabólica cuya longitud es de 7 m y alcanza la elevación 345.842 msnm se prolonga en una transición de vertical a trapecial con una plantilla de 3 m y taludes 1:1, la longitud de este tramo es de 15 m.

El gasto de diseño para operación normal es de 35.0 m³/s.

Características generales de la presa.

- a) REGION HIDROLOGICA 18, Balsas-Cutzamala
- b) AREA DE LA CUENCA HASTA EL SITIO 10 738.7 km²
- c) CAPACIDADES DE ALMACENAMIENTO

	ALMACENAMIENTO Millones de m ³	ELEVACIÓN m
Volumen muerto	220.0	348.30
Util	190.5	362.78 NAMO
Superalmacenamiento	174.5	368.0 NANE
Total	585.0	

- d) BORDO LIBRE 2.50 m
- e) AREAS DE EMBALSE 2 550 ha NAMO
3 625 ha NAME

1.5 Historia de la construcción.

Trabajos previos.

En el año de 1954, la entonces Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), inició estudios geológicos en diversos estrechamientos del río Cutzamala, con el objeto de construir obras para riego y aprovechamiento hidráulico, una de las cuales fue la presa derivadora "Hermenegildo Galeana", que en la actualidad riega los valles de Ixtapilla y Nuevo Galeana, Gro.

En esa época (1960), el Comité de Estudios del Río Balsas, consideró a la boquilla de "El Gallo" como el sitio más atractivo para la construcción de una presa, iniciando los estudios geológicos en el área de la boquilla, en el vaso de almacenamiento y en los sitios para las obras auxiliares, en el año de 1979. Estos se realizaron a través de pozos a cielo abierto, galerías y sondeos exploratorios con recuperación de núcleos y la práctica de ensayos Lugeon y Lefranc, que tuvieron como finalidad el conocer el subsuelo y las propiedades físicas de las rocas que la forman para fundar correctamente los diseños de las estructuras auxiliares y de la cortina.

Primera etapa.

Esta se inicia en el año de 1981, estando supeditada a los avances del proyecto Alto del Cutzamala y a restricciones presupuestales, por lo que la obra fue prácticamente suspendida durante los periodos 1984 -1985, 1988 y 1993- 1994. Durante el desarrollo de esta primera etapa se llevó a cabo la construcción del túnel de desvío, ubicado en la margen derecha, la ataguía aguas arriba que funcionaba en época de estiaje, el tratamiento de inyección, la limpieza dental de detalle y el emplazamiento de la mitad de la cortina en la margen derecha, quedando a solo 6.5 m de la elevación del proyecto original (370 m), dejando el paso del río por el cauce de la margen izquierda (Figura 7). A su vez el vertedor y la obra de toma quedaron casi concluidos, alcanzando un avance aproximado del 90%.

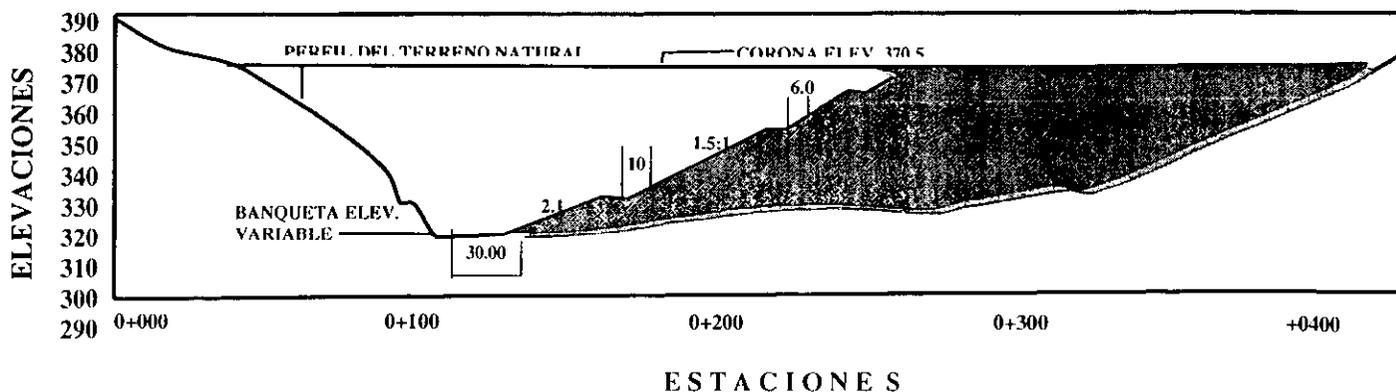


Fig. 7. Avance en los trabajos de construcción, durante la primera etapa¹.

¹ Redibujado de C.N.A. Presas de México. Vol. XVII. 1998.

En 1985 la SARH inicia la primera etapa de instalación de la instrumentación, colocando dos piezómetros abiertos y dos piezómetros eléctricos, además de dos inclinómetros. Durante los años de 1993, 1994 y 1995 la CFE realiza estudios de factibilidad de cinco alternativas para el equipamiento del proyecto; en todas ellas los resultados indican características poco favorables para el emplazamiento de las obras de generación eléctrica.

En 1996 la CNA solicitó a la CFE realizar los trabajos concernientes a la revisión del proyecto de instrumentación, incluyendo el dictamen del funcionamiento de la instrumentación instalada, la propuesta de reparación o sustitución de la misma y llevar a cabo la colocación de los instrumentos faltantes.

Segunda etapa.

En abril de 1997 la Comisión Nacional del Agua (CNA) decide continuar con la construcción de la presa "El Gallo" solicitando a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizar la evaluación de las condiciones del tratamiento realizado en la primera etapa y de los materiales ya colocados en la cortina. Estos trabajos se llevaron a cabo mediante la perforación de nueve barrenos de exploración (seis en la cortina y tres en el dique de contención), con recuperación de núcleos y pruebas de absorción de agua tipo Lugeon y Lefranc. A finales de éste año se inicia la segunda etapa de construcción, simultáneamente comienza la instalación del nuevo proyecto de instrumentación finalizando los trabajos en diciembre del 98.

Durante este periodo se concluyen el dique y la obra de toma, se realiza el emplazamiento de la margen izquierda de la cortina y el taponamiento del túnel de desvío, y se llevó a cabo el primer llenado del embalse en que abarcó el periodo del 5 de junio al 27 de agosto de 1998. En la foto 4 se presenta una vista de la cortina a finales de 1997, cuando se reinician los trabajos de construcción.

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA.

Trabajos previos

En 1979, la SARH, a través de la empresa CIEPS realizó los estudios de geología en el área de la boquilla y el vaso, así como también en los sitios para las obras auxiliares; para ello se realizaron 38 sondeos exploratorios, 12 pozos a cielo abierto y 6 galerías; de las perforaciones se obtuvo recuperación de núcleos y en ellas se practicaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeon y Lefranc.

La conclusión de los trabajos fue realizada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) llevando a cabo varias campañas exploratorias en el área, la primera de ellas en 1983, en ésta se realizaron una serie de estudios enfocados a determinar los aspectos geológicos y geotécnicos de la margen derecha. Se efectuaron reconocimientos geológicos regionales y de detalle, la perforación de 5 barrenos de diámetro NQ, algunas pruebas de permeabilidad y trabajos petrográficos.

Durante 1992 fue estudiada la margen izquierda, se le cartografió a detalle y como complemento se realizaron 11 líneas de geofísica y 5 barrenos.

Los trabajos realizados durante 1994 consistieron en levantamientos geológicos a detalle en la margen derecha y en la margen izquierda la perforación de barrenos en los que se efectuaron pruebas de permeabilidad e instalación de piezómetros.

Durante la última campaña llevada a cabo en 1997 la CFE realizó un estudio del tratamiento de la cortina y del dique de contención, además de la integración geológica del sitio, de la cual se extrajo lo siguiente.

2.1 Geología regional.

En el área de estudio (Plano 1.) existen diversos tipos de roca cuya clasificación y características conforman los diferentes rasgos geomorfológicos presentes. Las rocas más antiguas son consideradas mesozoicas (Cretácico) y corresponden a una serie de rocas sedimentarias marinas localizadas al SE de la zona de la boquilla.

Sobreyaciendo a estas rocas se tiene una secuencia sedimentaria compuesta por areniscas y limolitas de sedimentación continental, las cuales ocupan un área considerablemente extensa en la zona de estudio. Además, existen rocas volcánicas tales como andesitas, tobas y brechas de la misma composición, a las que se les ha considerado de edad Oligoceno- Mioceno y se localizan en la zona de la boquilla y el embalse

2.1.1 Estratigrafía.

A continuación se describen las rocas que afloran en el área, mencionando sus características litológicas y distribución, haciendo referencia de la más antigua a la más reciente (Fig. 8).

Cretácico.

Formación San Lucas (Kisl)

La formación se compone de una secuencia de rocas de sedimentación marina compuesta por lutitas, areniscas e intercalaciones de areniscas de origen vulcanosedimentario. Las lutitas se encuentran en estratos que varían de 1 a 5 cm de espesor, su color es amarillo ocre. Las areniscas son de grano fino a medio en una matriz arcillosa, cementadas por calcita, en el campo se les encuentra dispuestas en estratos de 5 a 10 cm de espesor presentan un color que va de gris claro a gris oscuro. Las areniscas vulcanosedimentarias se componen de fragmentos líticos de forma subangulosa de areniscas y de rocas ígneas, cementadas en una matriz arcillosa, se les encuentra en estratos de hasta 20 cm de espesor y su color es gris verdoso.

Regionalmente las encontramos aflorando al poniente del sitio "El Gallo" y constituyen sierras alargadas con orientación N-S. En el campo están cubiertas discordantemente por la Formación Morelos; el espesor máximo observado es de 500 m aproximadamente.

Esta unidad contiene restos fósiles de plantas y *gasterópodos* que dan una edad del Cretácico Inferior. (Pantoja- Alor, 1959).

Formación Morelos (Kmm)

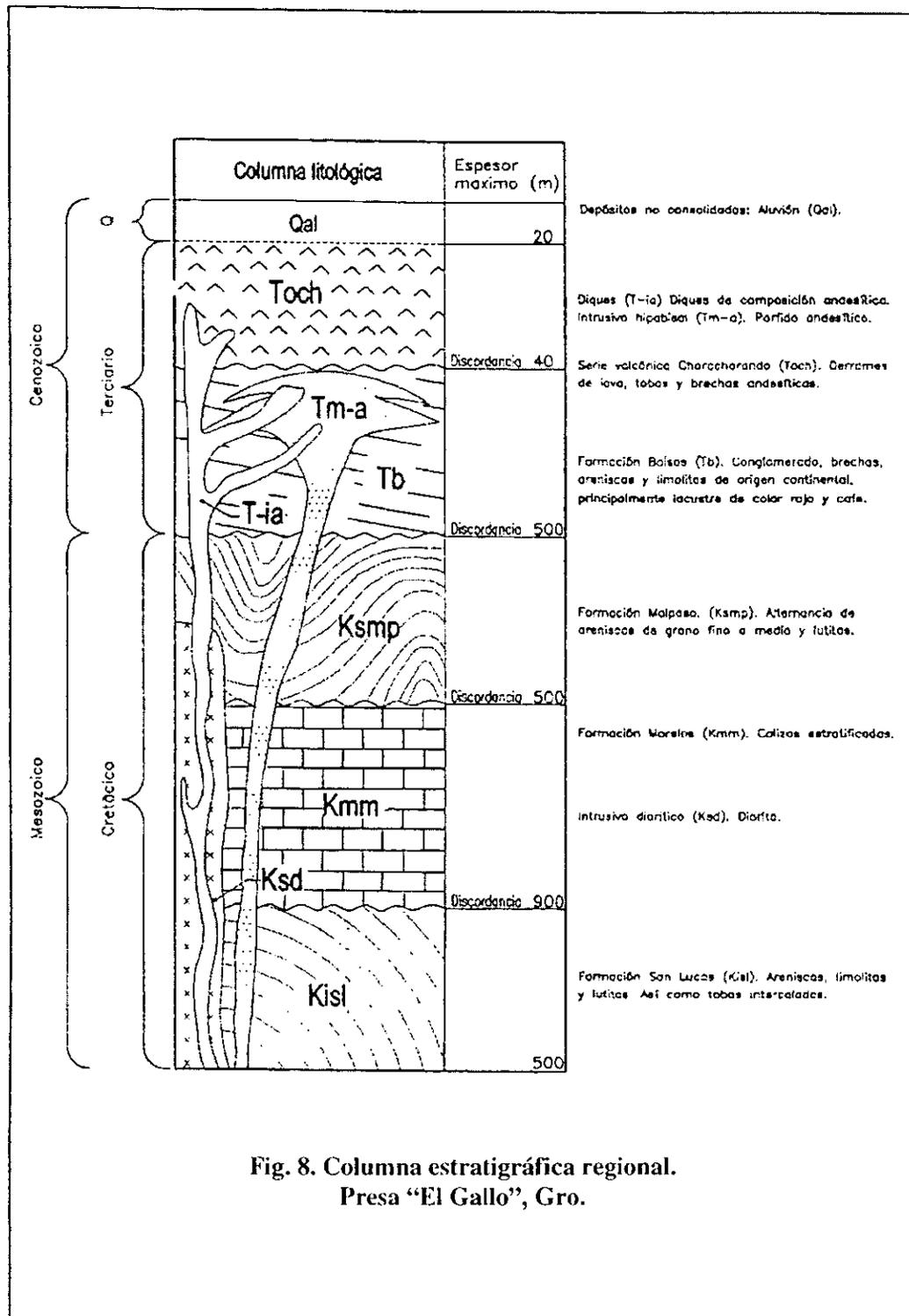


Fig. 8. Columna estratigráfica regional.
Presa "El Gallo", Gro.

Esta formación propuesta por Fries en 1960 consiste en una sucesión de calizas estratificadas de color gris oscuro a negro, aunque también puede presentarse masiva, que van de calcarenitas a calciruditas, observándose dentro de su composición restos fósiles de *rudistas*, *ostras* y *orbitolinas* bien preservados, los espesores de los estratos varían de 0.5 a 1.5 m. Intercalados con éstos encontramos intervalos delgados a medianos de lutitas de color gris oscuro, que al intemperie adquieren una tonalidad rojiza, indicando así la presencia de hematita en su composición, también es común encontrar lentes de pedernal negro.

Se distribuyen hacia la porción oeste del área de estudio caracterizándose por formar sierras alargadas con dirección N-S. Cubren en forma discordante a la Formación San Lucas, a su vez subyace en discordancia angular a la Formación Malpaso. El espesor reportado para esta formación es de 900 m aproximadamente. Por datación paleontológica Pantoja le asigna una edad del Cretácico Medio (Albiano Cenomaniano).

Intrusivo Diorítico (Ksd)

Roca de composición diorítica con textura fanerítica de grano fino que varía a porfírica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y clorita. Su color va de gris a verdoso.

Aflora en el arroyo El Pinzón, muy cerca de la boquilla, se encuentra afectada por diques de composición andesítica (T-ia) y a su vez afecta por metamorfismo a una roca antigua (corneana de albita epidota), la cual no alcanzó a asimilar, por lo que quedan pequeños remanentes; en el campo se encuentra cubierta en forma discordante por la Formación Balsas.

Cabe aclarar que este intrusivo no se ha explorado completamente, por lo que no se ha definido ni el tipo de cuerpo que forma, ni sus dimensiones; sin embargo sus características corresponden a un intrusivo con estructura de tronco y composición diorítica que cita Pantoja-Alor (1959) en la localidad de Cutzamala de Pinzón y SW de Tamácuaro. Éste cuerpo afecta a la Formación Morelos y su emplazamiento es anterior a la Formación Balsas, por lo que se le ubica en el Cretácico Superior.

Formación Malpaso (Ksmp)

Unidad marina constituida por una alternancia de lutitas negras silíceas, limolitas y areniscas de grano fino a medio de color gris claro a amarillo ocre, dispuestas en estratos que van de 2 a 5 cm de espesor. Se encuentra aflorando en la porción NW del proyecto, donde cubre de manera discordante a la Formación Morelos y subyacen a la Formación Balsas. Se le calcula un espesor de aproximadamente 500 m.

Pantoja-Alor (1959), le asigna una edad Cenomaniano- Santoniano (Cretácico Superior) por su contenido faunístico. De Cserna (1983), la correlaciona con la Formación Arcelia en el levantamiento geológico correspondiente al área de Tejupilco, Edo. de México

Terciario.

Formación Balsas (Tb)

Se encuentra constituida por una secuencia de conglomerados, brechas, areniscas y limolitas, todas de origen continental, principalmente lacustre, en algunos casos con depósitos intercalados de rocas volcánicas, con variaciones litológicas, tanto lateral como verticalmente; se le caracteriza por su color rojo violeta o morado y la presencia de estratificación cruzada.

Las areniscas son de grano fino a medio, en una matriz limo-arcillosa, el escaso cementante por lo general es calcita; se caracteriza por presentar estratificación laminar o delgada, agrupados en paquetes de 5 a 30 cm de espesor.

Los conglomerados y las brechas son escasos y se llegan a observar intercalados en la formación; están constituidos por fragmentos que van del tamaño de la arena hasta 14 cm de diámetro en promedio, su forma es subredondeada a subangulosa, de naturaleza volcánica y sedimentaria. Los encontramos empacados en una matriz limosa, con tonalidad rojiza debida al alto contenido de hematita.

Por último, las lutitas al intemperizarse se fracturan en forma concoidal y se separan en laminillas delgadas, el espesor de los estratos va de 1 a 30 cm; también son de color rojizo por el alto contenido de hematita en su composición.

Esta formación la encontramos ampliamente distribuida rellenando todo el valle donde se localizan los poblados de Nuevo Galeana y Arroyo Grande, extendiéndose hasta el estado de Michoacán; el espesor máximo observado es de 500 m aproximadamente. En el sitio de la boquilla, se distribuyen ampliamente en ambos márgenes

Edwards (1955) y Fries (1957) la han correlacionado con el miembro inferior del Conglomerado Rojo de Guanajuato, por tal razón se le asigna una edad que va del Paleoceno al Eoceno.

Serie Volcánica Characharando (Toch)

Esta unidad la encontramos compuesta por coladas y brechas andesíticas; las andesitas están constituidas por fenocristales de plagioclasas visibles y piroxenos, son masivas, compactas de textura porfídica y matriz afanítica. El color que presentan va de gris oscuro a verdoso.

Las brechas volcánicas tienen en su composición fragmentos líticos de basalto y andesita con un tamaño de hasta 20 cm de diámetro con una disposición caótica, la matriz que les une es de composición andesítica y su textura es piroclástica. La roca se observa sana, poco fracturada y de alta consistencia.

A nivel regional la encontramos aflorando al NE y NW del sitio del proyecto y cubren discordantemente tanto a la Formación Balsas como a la Formación Morelos. Su espesor es pequeño llegando solo a 40 m. Estratigráficamente se le ubica del Oligoceno superior al Mioceno (Pantoja- Alor, 1959)

Intrusivo Hipabisal (Tm-a)

Cuerpo intrusivo hipabisal que se emplazó en las rocas de la Formación Balsas y por la forma que adopta puede interpretarse como un cuerpo lacolítico o un manto. Pórfido andesítico de color gris claro a verdoso, con apariencia masiva, medianamente fracturada y muy compacta.

Esta roca se encuentran en el área de la boquilla y en los cerros El Gallo, La Cacamicua, La Campana y El Mango donde posiblemente se localice el tronco de este cuerpo o bien posea varios conductos alimentadores. El mayor espesor expuesto es del aproximadamente 100 m, en el cerro El Mango.

Se le considera como un evento contemporáneo a la secuencia Characharando, con una edad del Mioceno.

Diques (T-ia)

Cuerpos tabulares de composición andesítica que intrusieron a toda la secuencia de rocas de la región, con espesores de 1 a 8 m y longitudes máximas observadas de 150 m. Su mineralogía reporta básicamente fenocristales de plagioclasa, escaso cuarzo y feldespatos alcalinos rellenando algunas oquedades. La textura de estas rocas es porfídica con matriz afanítica. Son de color verde claro a verde oscuro. Sus contactos con la roca encajonante son cerrados y en casos aislados llegan a desarrollar metamorfismo de contacto.

Se encuentran expuestos en la zona de la boquilla donde afecta a la Formación Balsas, al Intrusivo Hipabisal y a la Serie Volcánica Characharando, con base en estas relaciones de campo se les ubica en el Terciario Superior

Depósitos de Aluvión (Qal)

Se encuentra constituido por materiales que han sido transportados por el escurrimiento de ríos y arroyos, por lo cual han sufrido un desgaste variable presentando tamaños que van de arenas a gravas y bloques; su composición es heterogénea, ya que contiene fragmentos de las diversas litologías que cruzan los ríos a su paso; las formas que se observan van de subredondeadas a subangulosa. Se localizan primordialmente en las partes topográficamente bajas a lo largo del río Cutzamala.

2.1.2 Geología Estructural.

Como resultado de las exploraciones geológicas realizadas en el sitio, se detectaron alineamientos con direcciones preferenciales NW- SE, NE-SW Y NS (Plano 01.) que pueden ser correlacionados con las estructuras geológicas regionales, tal es el caso de la falla normal localizada en la margen derecha, al poniente del vertedor con un rumbo $N12^{\circ}W$ buzando con $75^{\circ} SW$, la longitud observada en la falla es de 150 m, en esta margen no se observa ninguna otra estructura (Plano 02.).

Las estructuras en la margen izquierda están ocultas por la roca descomprimida y los materiales de rezaga que se han removido durante la construcción de la cortina y el dique de contención; el pequeño valle alineado NW-SE, al este del cerro La Cacamicua, podría corresponder a una estructura regional importante. Considerando los lineamientos y los cortes de los barrenos se interpretó que el cuerpo hipabisal que aflora en ambas márgenes tuvo su emplazamiento en este último alineamiento o evento.

La intrusión del cuerpo hipabisal en las areniscas y limolitas preexistentes ocasionó un empuje que les produjo un combamiento alineado NW-SE (cerros La Cacamicua en la margen izquierda y El Gallo en la margen derecha) generando esfuerzos laterales al mismo, los cuales al cesar y relajarse causaron que la roca encajonante fallara normalmente dando lugar a estructuras escalonadas subparalelas con orientación preferencial $N20^{\circ}-30^{\circ}W$ y buzamiento subvertical al NE con rangos de 80 a 85° (Plano 02); estas estructuras fueron emplazadas por nuevos cuerpos ígneos de forma tabular (diques) al reactivarse la cámara magmática y se orientaron de acuerdo con las estructuras preexistentes o semiparalelos a la estratificación.

El plegamiento observado en la formación Balsas es poco intenso en el área y muestra un flanco de un gran anticlinal con buzamiento general hacia el este, con una inclinación media de 10° , esta generalización no puede decirse con certeza para la formación Morelos, en la cual aparentemente, la intensidad de los plegamientos, hacia la zona oeste del poblado de Arroyo Grande, fue más grande que en las capas de la Formación Balsas, con esto se deduce que el plegamiento de las rocas, en la zona de interés, fue, en parte, disarmónico.

En la secuencia volcanosedimentaria se encontró un ligero basculamiento de sus capas, guardando la tendencia regional al $N30^{\circ}W$, con una inclinación de 10° a 25° al SW, la influencia de los cuerpos intrusivos provocó un fracturamiento multidireccional, con una orientación preferencial de las estructuras hacia el NE, aunque las de mayor longitud muestran la tendencia de los sistemas de fracturamiento regional predominante al NW- SE.

De los estudios estereográficos se desprende que la familia estructural que domina en el área es la que corresponde al rumbo $N 20^{\circ}-66^{\circ} E$ y echado $65^{\circ}-84^{\circ} NW$. Tanto en las secciones geológicas, como geológico – geofísicas se muestran las principales estructuras que afectan a la zona de estudio (Planos 03 y 04). En la figura 9 se representan los principales sistemas de discontinuidades que afectan a las diferentes rocas del sitio, éstos han sido denominados α , β , γ y δ ; sus características serán señaladas en el capítulo 3.2.2 de Sistemas de Discontinuidades.

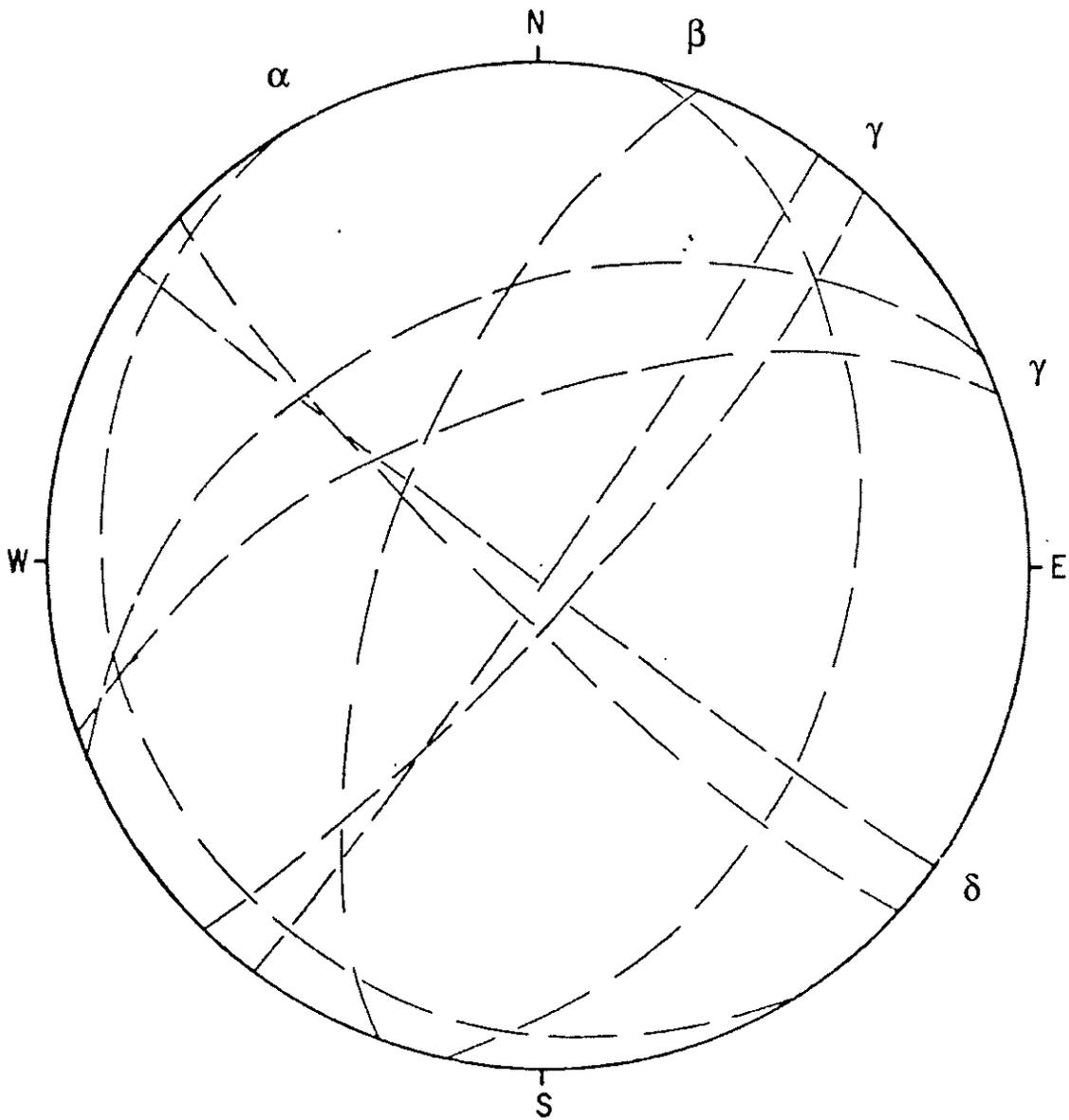


Fig. 9. Sistema de discontinuidades principales¹

¹ Referencia. C.F.E. Informe geológico, 1995.

2.1.3 Geología Histórica.

El área de estudio pertenece a la zona conocida como Terreno Guerrero, del cual existen varias interpretaciones diferentes sobre la evolución geológica de la región. A continuación se darán a conocer las interpretaciones expuestas por De Cserna y Campa.

Según De Cserna (1978), la paleogeografía que se puede observar es un modelo sencillo sin complicaciones tectónicas, simplemente se interpreta que la Formación Morelos (calizas de plataforma) cambia de facies por la presencia de una cuenca en el sitio durante el Albiano-Cenomaniano.

Se habla de una plataforma al oriente y hacia el poniente el mar abierto donde se acumularon sedimentos terrígenos finos. En el área al occidente de Teloloapan parece haber existido una saliente, al igual que lo que ocurría en la parte norte, lo cual ocasionó depositación de calizas de la formación Morelos directamente encima de rocas volcánicas antiguas. Las tobas en el poniente indican la transición de miogeosinclinal a eugesinclinal. Más adelante el aumento del nivel del mar (en el Albiano-Cenomaniano), permite la proliferación de bancos de *rudistas* en el borde occidental. La laguna se incorpora entonces al mar y en el fondo se precipitan *miliólidos* que forman calizas de plataforma (Fig. 9 y 10).

La región Chilacachapa se eleva del mar al final del Cenomaniano y sufre erosión. Hacia el occidente cambia la sedimentación con manifestaciones volcánicas submarinas; al terminarse se depositan clásticos finos que se vuelven calcáreos hacia el Turoniano (Fig. 11); para el Coniciaco el mar cubre toda la región a excepción de los cuerpos graníticos sobresalientes (Fig. 12)

La interpretación tectónica de Campa (1978) es la siguiente:

En Teloloapan las rocas volcánicas andesíticas, rocas sedimentarias calcoarcillosas foliadas y las grauvacas constituyen un arco volcánico insular y mar marginal desarrollado en el Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

En Huetamo se encuentran rocas volcanosedimentarias del Jurásico Cretácico que se vuelven más sedimentarias hacia la cima. En la base tenemos lavas y tobas andesíticas del Jurásico, lutitas- areniscas, tobas del Cretácico Inferior (Neocomiano-Aptiano-Albiano Inf.) y calizas arcillosas del Albiano. Estas representan la zona transicional entre el dominio Mesozoico externo (plataforma Morelos- Guerrero) y el dominio Mesozoico Arco insular (afloramientos de la Sierra Madre del Sur de tipo volcanosedimentarios). (Fig. 13).

Ésta última interpretación es apoyada por los recientes trabajos de geoquímica que han sido realizados por Centeno - García (1993), quien con base en las afinidades geoquímicas que muestran las rocas ígneas de la localidad define que nos encontramos en un arco insular.

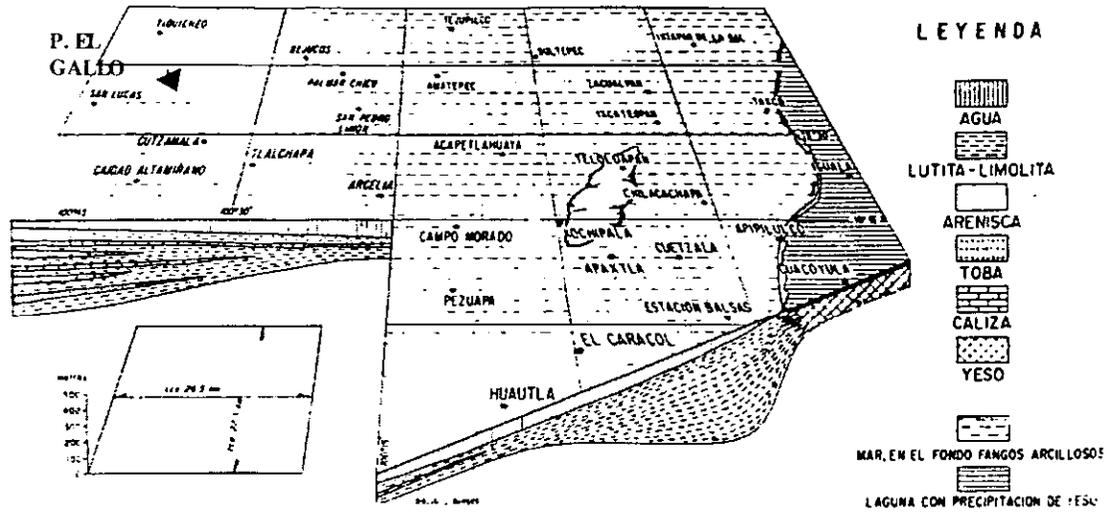


Fig. 10. Diagrama Paleogeográfico isométrico y secciones restauradas en la parte noroccidental de Guerrero y regiones circundantes, a principios del Albiano.

Modificado de De Cserna, Z.- Pantoja Alor. 1978

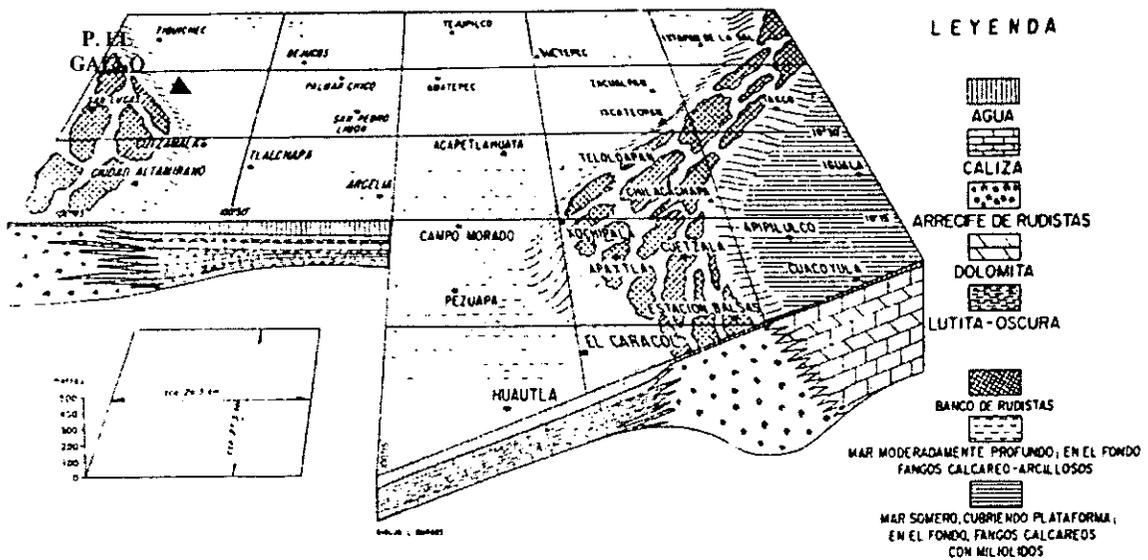


Fig. 11. Diagrama paleogeográfico isométrico y secciones restauradas en la parte noroccidental de Guerrero y regiones circundantes, a principios del Cenomaniano.

Modificado de De Cserna, Z.- Pantoja Alor. 1978

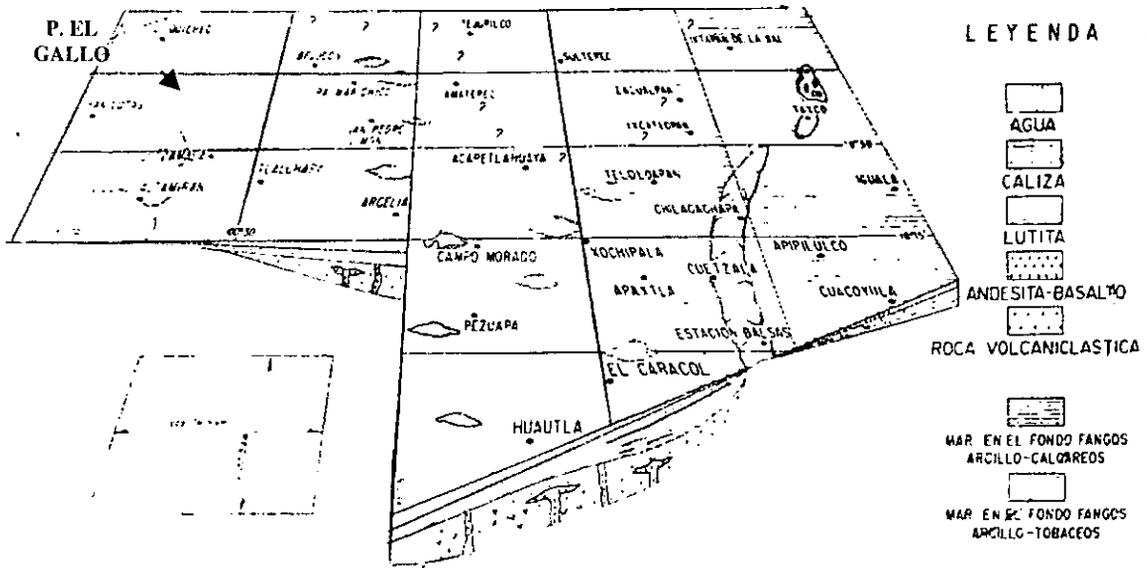


Fig. 12. Diagrama paleogeográfico isométrico y secciones restauradas en la parte noroccidental de Guerrero y regiones circundantes, a finales del Turoniano.

Modificado de De Cserna, Z.- Pantoja Alor, 1978

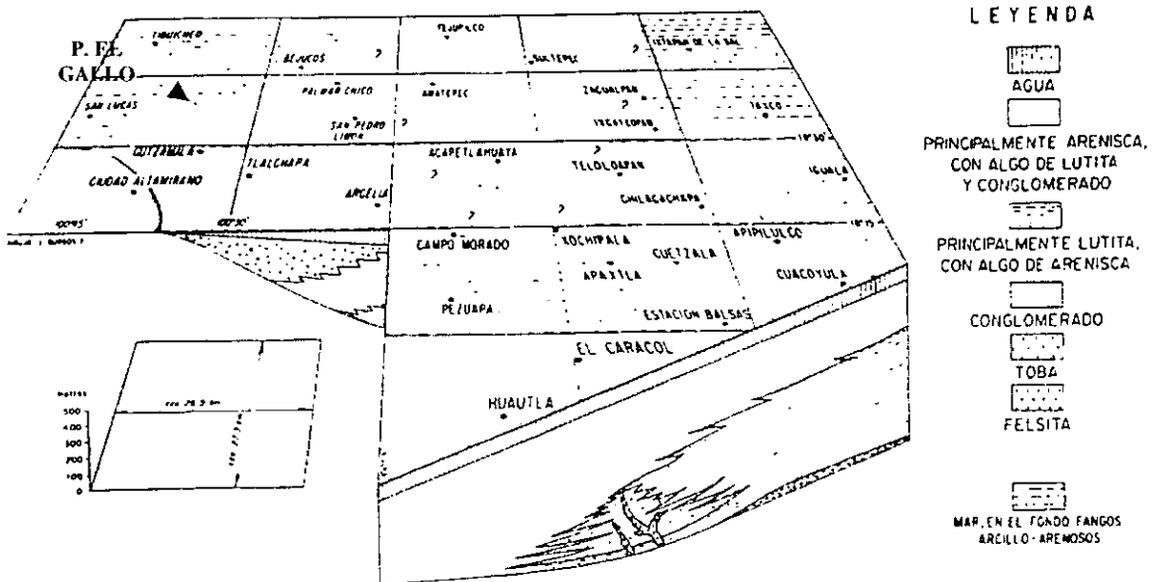


Fig. 13. Diagrama paleogeográfico isométrico y secciones restauradas en la parte noroccidental de Guerrero y regiones circundantes, a finales del Coniaciano.

Modificado de De Cserna, Z.- Pantoja Alor, 1978

MODELO TECTONICO ESQUEMATICO DE LA SIERRA MADRE DEL SUR

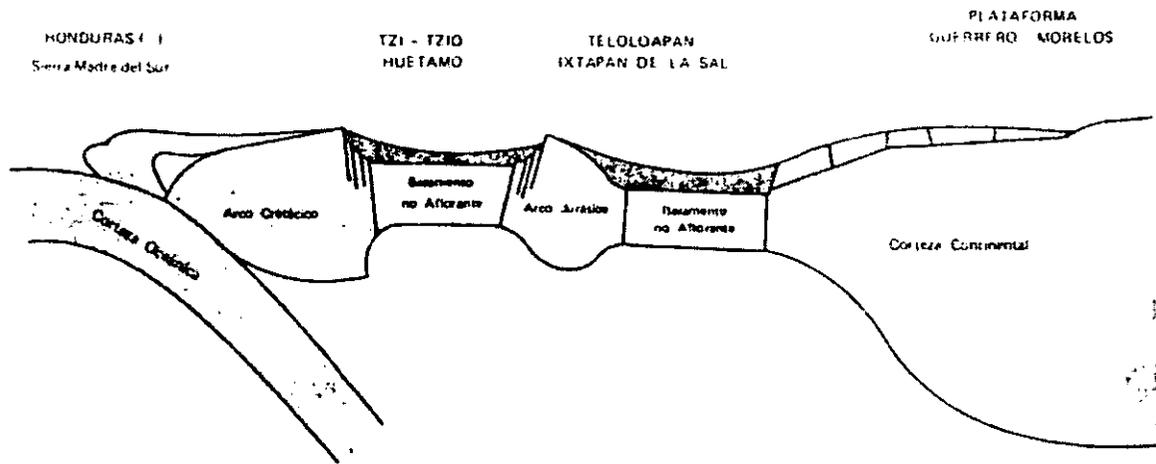


Fig. 14. Modelo esquemático de la Sierra Madre del sur (según Campa y Ramírez, 1979)

2.2 Geología Del Vaso.

En el embalse afloran lutitas, areniscas y conglomerados de origen continental que corresponden a la Formación Balsas (Tb); éstos se distribuyen desde la boquilla hacia aguas arriba sobre el río Cutzamala, por alrededor de 25 Km abarcando hasta una porción del estado de Michoacán. En general las rocas se encuentran pobremente consolidadas y afectadas por una gran cantidad de discontinuidades y cuerpos intrusivos de composición andesítica (T-ia), especialmente en el área de la boquilla (sección A-A', Plano 3)

Cubriendo de manera discordante tanto a la Formación Balsas como a la Formación Morelos (Kmm) encontramos la serie volcánica Characharando (Toch) compuesta por derrames de lava, tobas y brechas de composición andesíticas. Estas afloran ampliamente hacia la parte NE y NW del área del embalse. A diferencia de la Balsas, la roca se observa en buenas condiciones y poco afectada por las discontinuidades regionales.

Hacia la parte N- NW se presenta el macizo calcáreo de la Formación Morelos (Kmm) - calizas y lutitas de color gris, con lentes de pedernal negro- cuya topografía abrupta conforma una auténtica barrera natural que impide la fuga de agua hacia otras cuencas. Esta barrera se extiende desde la confluencia del río Tuzantla al Cutzamala hasta el poblado de Tiquicheo, Mich., con una extensión aproximada de 20 Km. También se encuentra afectada por los lineamientos regionales y fallas normales que siguen una orientación NW- SE.

En resumen, desde el punto de vista estructural, en el área del vaso no se encuentran bloques inestables ni estructuras de falla, con posibilidad de ser un conducto franco del agua a zonas menos elevadas que pudieran afectar el proyecto. En el plano 01 se representa la geología superficial del área del embalse.

2.3 Geología de la Boquilla.

La geología del sitio está representada principalmente por las formaciones Balsas, Serie Volcánica Characharando, el Intrusivo Hipabisal y los diques andesíticos. Éstas se representan en la columna estratigráfica de la Figura 14 y en el plano 2 donde se observa su distribución superficial.

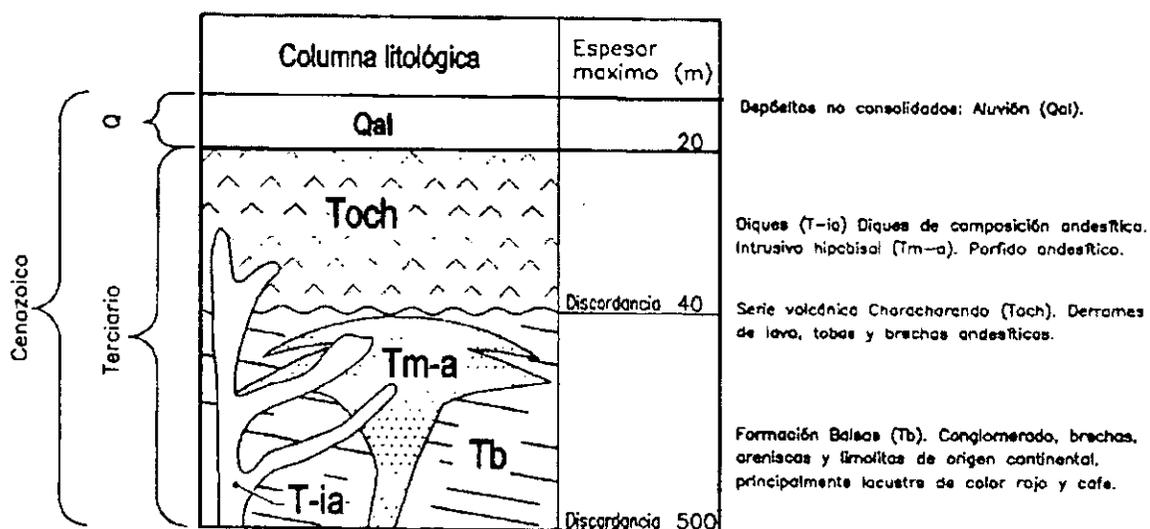


Fig. 15. Columna estratigráfica del sitio¹.

Formación Balsas (Tb)

En la boquilla ésta consiste en una secuencia de conglomerados, brechas, areniscas y limolitas. Los conglomerados están constituidos por fragmentos líticos de composición andesítica con un tamaño promedio de 4 cm de diámetro, de forma subangulosa a subredondeada, en una matriz arcillo arenosa. La textura de estas rocas es epiclástica y tienen un color rojo pálido debido a la presencia de hematita en su composición. El espesor medido en los estratos alcanza los 50 cm (Foto 5).

Las areniscas son de grano fino a grueso, con una matriz limosa y escaso cementante calcáreo; su textura es epiclástica y el color que presentan es rojo violáceo, por el contenido de hematita en su composición. Se observan en estratos de 5 a 30 cm de espesor.

Por otro lado, las limolitas están conformadas por sedimentos muy finos, que se encuentran en estratos laminares, formando paquetes de espesores variados, siendo los mayores de 10 cm.

¹ Tomado de C.F.E. Integración Geológica del Proyecto. 1998.

Les caracteriza el intemperismo esferoidal que se presenta en ellas y su color rojo violáceo que delata su alto contenido de hematita.

Las estructuras primarias observadas son de estratificación delgada, cruzada, graduada y cíclica, además de laminillas milimétricas de calcita paralelas a la estratificación. Entre los fragmentos líticos que integran a las rocas de esta formación predominan los de composición andesítica, lo que indica un origen vulcanosedimentario.

La Formación Balsas se encuentra ampliamente distribuida en ambos márgenes del sitio, sobre todo en sus partes media a baja; se ve cubierta en forma concordante por el pórfido andesítico (Tm-a), ambas unidades litológicas se vieron afectadas por la alteración hidrotermal que sufrieron por el emplazamiento de los diques de composición andesítica (Ti-a), este detalle se puede ver en la sección A-A', plano 3. La orientación observada en la estratificación de la margen derecha es de N 30° W / 14° SW

En la margen izquierda, el pórfido hipabisal (Tm-a) cubre a la Formación Balsas, la que en ocasiones se observa claramente intrusionada a través de sus planos de estratificación.

Durante la campaña de 1995, en el barreno TP-15 se cortó un lente de 30 cm de espesor de una toba lítica dacítica con matriz criptocristalina cuarzo - feldespática y arcillosa por desvitrificación, por lo que se infiere que dentro de la Formación Balsas (Tb) hay pequeños lentes de material netamente piroclástico.

Serie Volcánica Characharando (Toch)

Está compuesta por lavas, brechas y tobas de composición andesítica. Las lavas están representadas por andesitas de color gris oscuro cuya composición tiene fenocristales de plagioclasa incluidos en una matriz afanítica.

Las brechas están compuestas por fragmentos de roca de forma angulosa cuyos tamaños varían de 0.5 a 15 cm de diámetro, todos ellos soldados en una matriz afanítica. La textura de estas rocas es piroclástica y en su composición predominan los líticos andesíticos, presentan un color gris oscuro a verdoso.

Por su parte las tobas están compuestas por pequeños fragmentos de roca y cristales de cuarzo, en una matriz afanítica de composición andesítica. La textura es piroclástica, microscópicamente se le observan como elementos esenciales fragmentos de roca extrusiva y plagioclasas sódicas, como mineral accesorio se presenta la pirita y como secundarios la calcita y óxidos de hierro en una matriz criptocristalina cuarzo - feldespática por desvitrificación. El color observado es gris oscuro a verdoso.

Esta unidad aflora al W del sitio de la boquilla; en el cerro Pelillos, cerca del área del vertedor y obra de toma para riego, cubre discordantemente a la Formación Balsas (Tb), su contacto es irregular y está sellado, pirometamorfizándola en una zona de 15 a 30 cm de espesor.

A su vez esta unidad se encuentra cortada por diques tabulares de composición andesítica, cuyos contactos están cerrados y en ocasiones sellados, desarrollando alteración de espesores variables.

Intrusivo Hipabisal (Tm-a)

Pórfido andesítico compuesto por fenocristales alargados de plagioclasa, de tamaño variable entre 1 y 3 cm, acompañados de biotita en escasa proporción dentro de una matriz afanítica; es de apariencia masiva y compacta, afectado tanto por fracturamiento como por diaclasamiento, debido al proceso de enfriamiento relativamente rápido de la masa rocosa, con la consecuente contracción que origina diaclasas mal definidas, que en algunas zonas produce un intenso lajeamiento. Microscópicamente se le observan como minerales esenciales a la andesina y oligoclasa; como minerales accesorios a los máficos, completamente alterados, al apatito y minerales opacos y como minerales secundarios aparecen el óxido de hierro y los minerales arcillosos, todos ellos envueltos en una matriz de microlitos de plagioclasas, cuyos intersticios están ocupados por material microcristalino. El color observado en la roca sana es gris verdoso que intemperiza a crema o gris verdoso muy claro con manchas negras y blancas (foto 6).

Este cuerpo ígneo se emplazó de manera fisural, a través de las estructuras regionales alineadas NW – SE, siguiendo la estratificación de las rocas encajonantes y dando como resultado una estructura de forma aproximada de lacolito o sill; es probable que en el cerro El Mango, localizado en la margen izquierda, se tenga el tronco de este cuerpo hipabisal, pero también pudiera ser que existiesen varios centros de emisión.

En la margen derecha el pórfido andesítico (Tm-a) se encuentra cubriendo a las rocas de la Formación Balsas (Tb), el espesor máximo reportado por los barrenos de la campaña realizada en 1983, es de 64 m.

El sistema principal de fracturamiento presente en esta margen tiene una posición N66°E / 84° NW. Esta formación también se encuentra afectada por la intrusión de diques andesíticos que provocaron zonas de alteración.

Mientras que en la margen izquierda, el pórfido hipabisal (Tm-a) se encuentra coronando la parte alta del cerro La Cacamicua, cubriendo la Formación Balsas (foto 7) y también formando una franja que baja hacia el río Cutzamala; el espesor estimado en esta margen es de 55 m aproximadamente, en ocasiones se identificaron algunos bloques de rocas sedimentarias que no alcanzaron a ser asimilados (sección A-A', plano 03).

Las rocas de esta margen están afectadas por estructuras de falla, con orientación preferencial al NW, algunas de estas discontinuidades fueron emplazadas por diques, como se puede ver en las secciones

Diques (T-ia)

Estructuras de forma tabular, compactas, de composición andesítica con fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica; presentan un color gris oscuro a verdoso. Su extensión varía de escasos metros hasta más de 100, con espesores desde un metro, hasta 8 m. Su origen es ígneo intrusivo de enfriamiento superficial.

Se presentan siguiendo la dirección del sistema regional que afecta a la zona, aunque también los hay en dirección NE- SW y más escasamente N- S.

Al parecer los diques tuvieron diferentes etapas de emplazamiento, algunos de ellos son de tipo múltiple, es decir, hubo más de un evento alojado en el mismo plano de debilidad y en algunas ocasiones con ramificaciones.

Es posible que las zonas de alteración y metasomatismo observadas en algunos afloramientos hayan sido provocadas por el emplazamiento de los diques y el ascenso de soluciones hidrotermales.

Estos cuerpos intrusivos se presentan en ambos márgenes, afectando tanto a la Formación Balsas (Tb), como al pórfido andesítico (Tm-a); esto se puede ver claramente nuevamente en la sección A-A', plano 03 y en la foto 6.

Aluvión (Qal)

A lo largo del río Cutzamala se encuentra un conjunto de materiales que fueron transportados por ríos y arroyos, constituidos por arenas, gravas y bloques de formas subredondeadas, debidas al desgaste provocado por el transporte, su composición es heterogénea. Se localizan principalmente a lo largo del río Cutzamala.

Rezaga (R)

Se encuentra constituida por todo el material producto de la excavación para la construcción de las obras civiles.

Éste material por ser muy reciente no se encuentra consolidado, se compone de fragmentos de las diferentes rocas encontradas en el sitio (rocas ígneas hipabisales andesíticas y sedimentarias), sus formas van de angulosas a subangulosas, mientras que sus tamaños varían desde 10 cm hasta bloques de 1.5 m aproximadamente. Estos materiales removidos artificialmente han cambiado la configuración topográfica original del terreno y ocultado algunas estructuras geológicas.

CAPÍTULO 3

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO.

Con la finalidad de conocer las características geomecánicas de las rocas distribuidas en el subsuelo del sitio de la presa, se efectuaron diferentes campañas tanto de exploración directa (barrenación) como indirecta (geofísica).

Durante la campaña de 1979, realizada por la SARH a través de la compañía CIEPS, se efectuaron en total 38 sondeos, 15 en la zona de la cortina, 12 en el vertedor, 4 en el túnel de la obra de toma, 4 en el túnel de desvío y 3 en el dique. Todos ellos tuvieron como finalidad primordial conocer el subsuelo y las propiedades físicas de las rocas que lo conforman para fundamentar correctamente los diseños de las estructuras auxiliares y de la cortina.

Posteriormente la CFE consideró conveniente estudiar la viabilidad de aprovechar la infraestructura de las obras de contención (cortina y dique) y de control de demasías para equipar la presa con una planta generadora de energía eléctrica, para lo cual dio inicio en 1983 a trabajos en la margen derecha, donde se estudiaron dos alternativas de la hidroeléctrica y se perforaron 5 barrenos. En vista de que CFE consideró que los resultados obtenidos mostraban condiciones poco favorables para el emplazamiento de las obras civiles, se efectuaron estudios en la margen izquierda para otras tres alternativas. Durante los años de 1992 se perforaron cinco barrenos, durante la campaña de 1994 se realizó la perforación de ocho barrenos más y se continuó otro de la campaña 1992, dando así un total de dieciocho pozos; la mayoría de los trabajos realizados en estas etapas del proyecto se encaminaron a obtener la distribución superficial de las unidades litológicas y las características geotécnicas de las unidades de roca del subsuelo (Fig. 16).

Finalmente durante la campaña de 1997, al reiniciarse los trabajos de construcción de la presa se efectuaron nueve perforaciones verticales, seis a lo largo de la pantalla y tres en el dique, con el fin de revisar la funcionalidad de la pantalla y determinar la permeabilidad residual después de la ejecución del inyectado (Plano No5).

A continuación se muestra un análisis de los resultados obtenidos de las exploraciones de 1979, las ejecutadas entre los años de 1983 y 1992 hasta 1995 y la última campaña realizada en 1997, donde se presenta la opinión de dos consultores externos además de un análisis realizado por el autor.

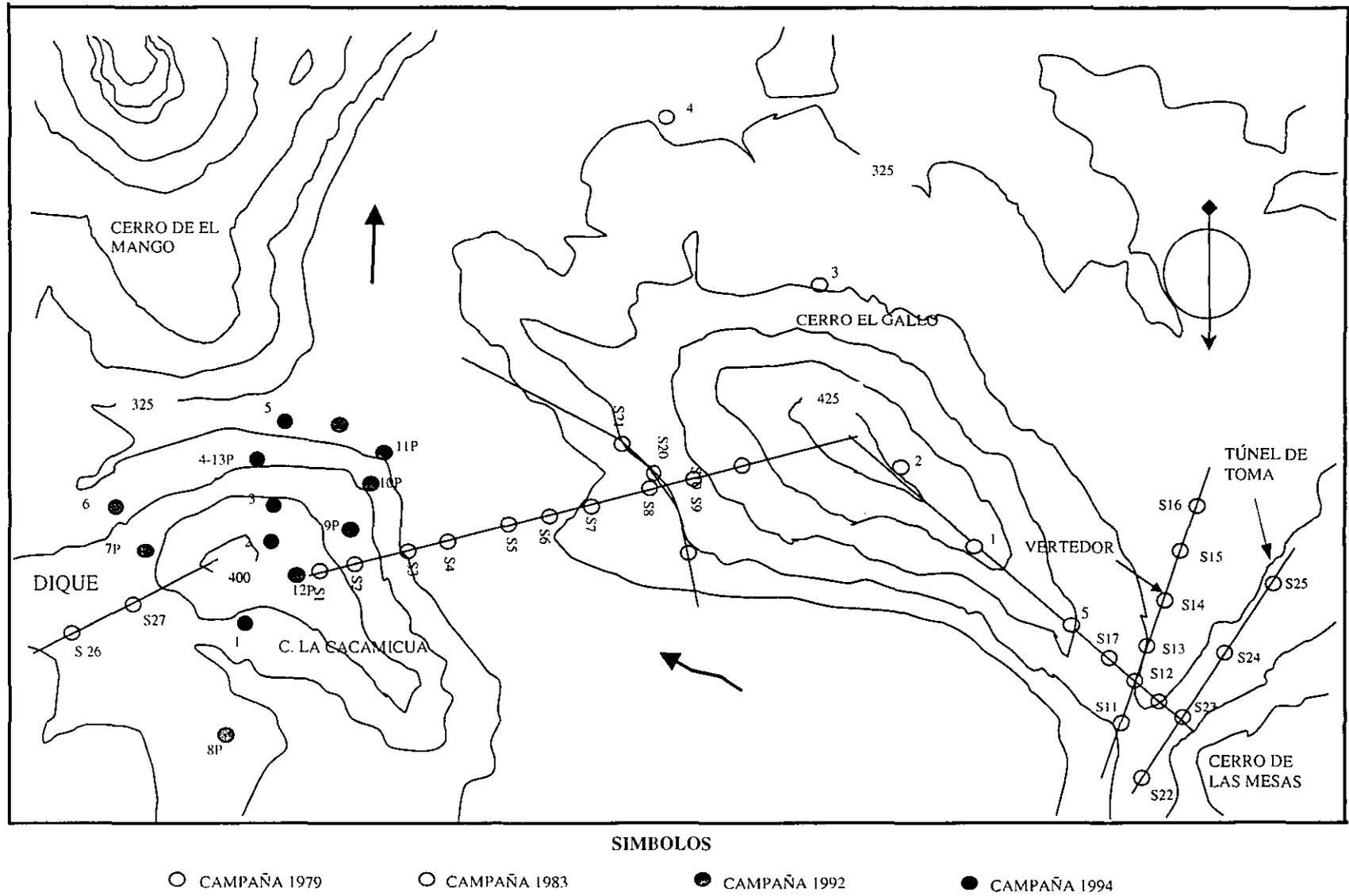


Fig. 16. Ubicación de los barrenos realizados en el proyecto "El Gallo"

3.1 Primeras exploraciones. Campaña 1979. CIEPS.

3.1.1 Porcentaje de recuperación.

El porcentaje de Recuperación es la relación de la longitud recuperada entre la longitud total perforada.

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Longitud Recuperada (m)}}{\text{Longitud Total Perforada (m)}} \times 100$$

En general los valores de recuperación son buenos, el porcentaje global de recuperación calculado en roca fija resulta del 80 %, en el área de la cortina oscilan entre 40 y 86 %, solo en el barreno de la exploración X, en la zona del cauce, se obtuvo un porcentaje bajo de 23 %; dando así un promedio de 66 %.

Estos valores bajos se deben a que la roca en superficie se encontraba muy fracturada y en ocasiones alterada, por lo que los núcleos se desmoronaban en sus primeros tramos. Esto se puede apreciar en los histogramas reportados para cada barreno (anexo II), en los que se aprecia la columna litológica reportada y las condiciones en que se encontraba la roca (fracturada, alterada, sana), el porcentaje de recuperación, el RQD y el resultado de las pruebas de absorción de agua de tipo Lugeon.

3.1.2 Índice de Calidad de Roca (RQD).

El RQD (Rock Quality Designation) fue definido por Deere (1964) como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud dividido entre la longitud total perforada.

$$\% \text{ RQD} = \frac{\sum \text{Fragmentos} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Longitud Perforada}} \times 100$$

Los valores calculados de RQD ayudan a medir el grado de alteración y fracturamiento de las rocas, dividiendo a los macizos rocosos en cinco categorías, que son:

<i>RQD (%)</i>	<i>Calidad</i>
0 - 25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Tabla No 1. Rango de valores del RQD.²

De los quince barrenos realizados en la zona de la cortina, los valores calculados quedan entre los rangos de roca de muy mala a regular calidad. El 20 % pertenecen al rango de muy mala calidad, el 47% en el de mala calidad y el 33% se califican como rocas de regular calidad. El RQD promedio se calculó de 40 %, para la zona de la cortina.

Estos porcentajes tan bajos se deben en primer lugar a la estratificación delgada de la Balsas y también al alto grado de fracturamiento y alteración de la roca, por lo que estos valores no siempre son indicativas de la compacidad real de la roca.

3.1.3 Pruebas de absorción de agua.

Durante todas las campañas realizadas para esta proyecto, se efectuaron pruebas de absorción de agua de tipo Lugeon y algunas de tipo Lefranc en las zonas someras y en aquellos pozos en los que la roca se encontraba más fracturada y alterada (Foto 8). En el Anexo II se encuentra el reporte de los barrenos realizados en las campañas del 79, 83, 92, 94 y 95, en los cuales se puede ver la litología cortada, las unidades Lugeon y la presión máxima a la que llegó la prueba.

Pruebas tipo Lefranc.

Consiste en inyectar agua en el terreno saturado, convirtiendo un tramo del pozo en un permeámetro; con base en el gasto de inyección, Q , y el valor de la sobrecarga ΔH , se determina la permeabilidad, K , del medio por la ecuación:

$$K = \frac{CQ}{H}$$

C es un coeficiente que caracteriza la geometría del área de infiltración del tramo de prueba, y su cálculo será diferente para cada situación

Pruebas tipo Lugeon.

Los ensayos Lugeon en los barrenos de la cortina fueron realizados de manera descendente conforme la perforación avanzaba en tramos de 5 m, con incrementos de presión de 0.5 kg/cm² cada 5 minutos, para determinar con mayor precisión la presión crítica a la cual se produce el hidrofracturamiento del terreno en el tramo probado. Posteriormente la presión manométrica se incrementó en 1 ó 2 kg/cm² hasta alcanzar los 10 kg/cm² que marca la unidad Lugeon. En algunos caso se tuvieron tan altos consumos que las bombas, a toda su capacidad (140 l/min), no lograron hacer elevar la presión, por lo cual solo se tomó el gasto inyectado durante 10 minutos.

Para esta campaña se hicieron 179 pruebas de absorción de agua tipo Lugeon repartidas en las exploraciones de la cortina, la zona del dique y la del vertedor. Los resultados reportados por CIEPS en el área de la cortina son los siguientes: 22% de las los tramos analizados se clasifican como impermeables, 10% como poco permeables, 12% como rocas permeables, 9% quedan en el rango de muy permeable y 50% se clasifican en el rango de altamente

permeables. Estos resultados se aprecian en los histogramas reportados para las exploraciones I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XIV, XXXI, XXXII Y XL del anexo II.

En la figura 17, se presenta por medio de histogramas, la frecuencia acumulada con que se presentaron los valores de absorción. Para la zona del cauce, podemos ver que el 40% de los registros obtenidos reportan una roca poco permeable. En la margen izquierda solo el 12.5% corresponde al rango de poco permeable y que poco más de un 60% de las lecturas fueron superiores a los 40 l/min/m, esto probablemente se debe al alto grado de alteración y fracturamiento que presenta la roca en esta margen. Por último en la margen derecha en el 30% de las lecturas se encuentran valores menores de 10 l/min/m, indicativo de poca permeabilidad y más de un 40% representan valores de alta permeabilidad. En la curva con la leyenda general se presenta el promedio de valores de absorción para la toda la zona de la boquilla y se confirman los valores reportados por la compañía CIEPS. Con estos datos se puede concluir que la margen izquierda es la zona que presenta mayor permeabilidad y la derecha es la zona más impermeable.

Esta clasificación se realizó con la siguiente escala, sugerida por la CFE.

0 - 3 U.L	Impermeable	25 - 40 U.L.	Muy permeable
3 - 11 U.L	Poco permeable	>40 U.L	Altamente permeable
11 - 25 U.L	Permeable		

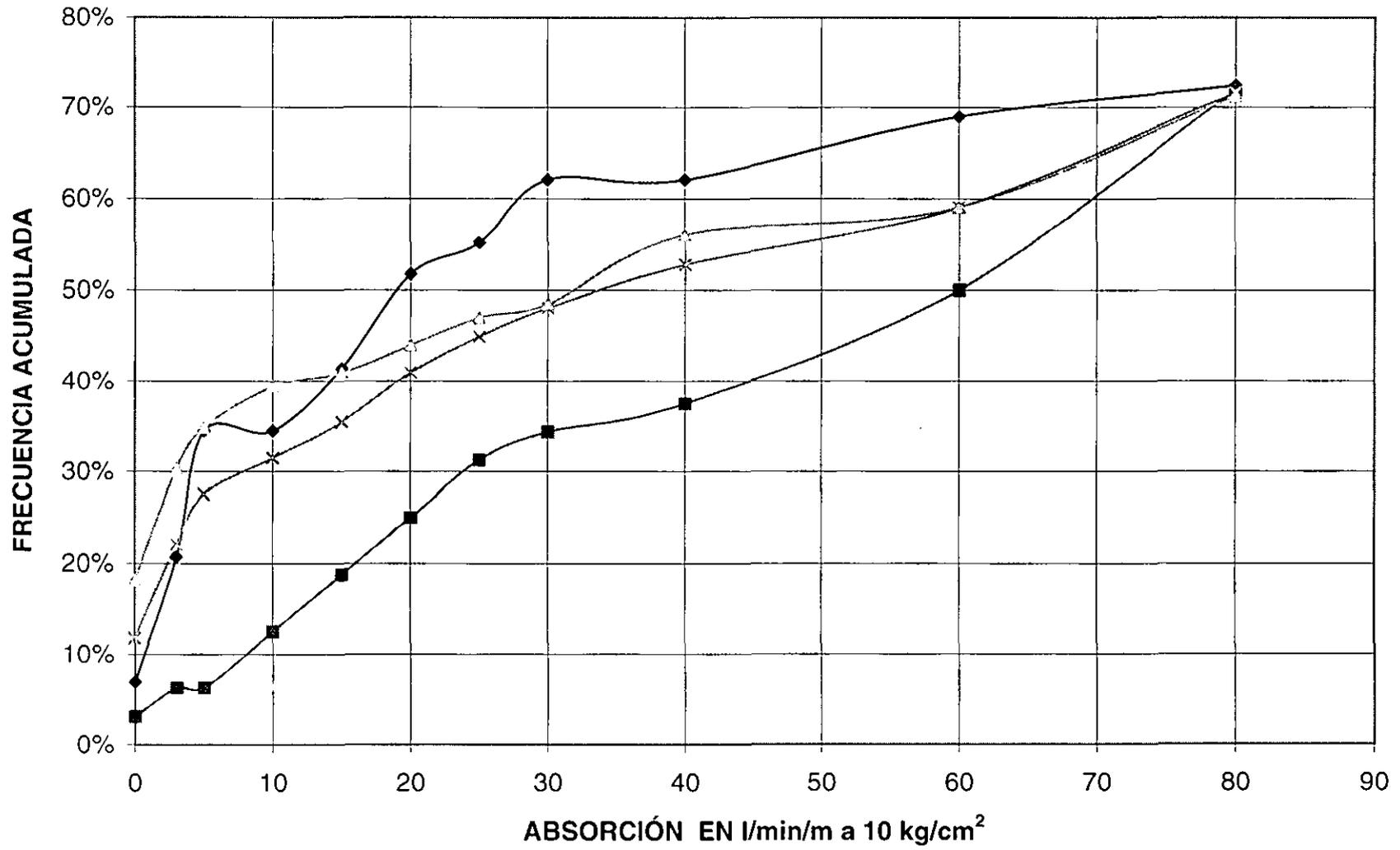
En la figura 18 se muestra una gráfica en la que se presentan los valores de absorción en $l/min/m$ a 10 kg/cm^2 en contra de la profundidad, para la margen derecha. Como se puede ver, no existe correlación entre la profundidad y la permeabilidad, encontramos roca impermeable, tanto en superficie, como a 60 m de profundidad; lo mismo ocurre con los valores de alta permeabilidad, $> 40\text{ l/min/m}$, que se encuentran a diferentes niveles de profundidad. Lo mismo sucede para la zona del cauce y para la margen izquierda (figuras 19 y 20), en donde los resultados observados son similares a los de la margen anterior, ya que tampoco se observa distribución alguna entre la profundidad y la absorción.

En estas gráficas se advierte cierta alineación de los valores de absorción, en los rangos de impermeable a poco permeable (0-11 U.L), con la profundidad; lo cual es indicativa de la baja absorción de agua de este macizo rocoso tanto en superficie como a profundidad. En cambio los valores representativos de absorciones mayores a 40 l/min/m muestran una distribución errática y su arreglo es aleatorio, por lo cual se puede considerar a estos como resultado del hidrofracturamiento de la roca y no representativos de la absorción real de la roca antes de ser hidrofracturada.

3.1.4 Comentarios adicionales.

En una entrevista personal con el ingeniero Jorge Roldán O, quien fuera el encargado de la campaña de exploración original, éste nos comentó que si se observan con cuidado los reportes de los sondeos en el anexo II, se puede notar que, por lo general, en las zonas en que se reporta una absorción mayor a 100 U.L, estas corresponden a tramos de roca sana, con poco fracturamiento y poca o nula alteración; por lo que se puede deducir que la mayoría de los valores corresponden a una permeabilidad inducida en la roca por hidrofracturamiento, esto es,

FIG. 17. HISTOGRAMA VALORES DE ABSORCIÓN



◆ MARGEN DERECHA ■ MARGEN IZQUIERDA ▲ ZONA DEL CAUCE × GENERAL

**Fig. 18. ABSORCIÓN VS PROFUNDIDAD
MARGEN DERECHA**

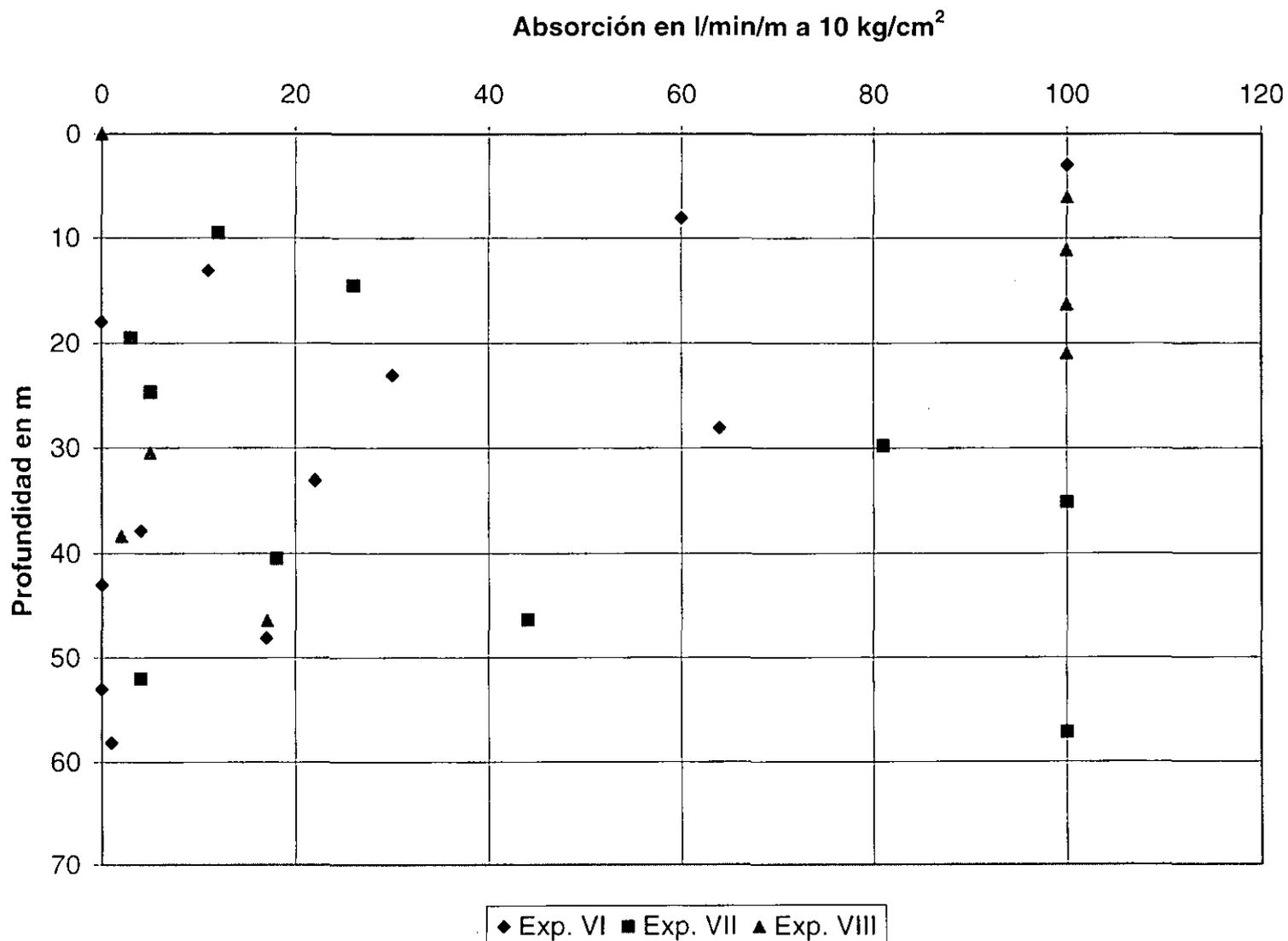


Fig. 19. ABSORCIÓN VS PROFUNDIDAD
ZONA DEL CAUCE

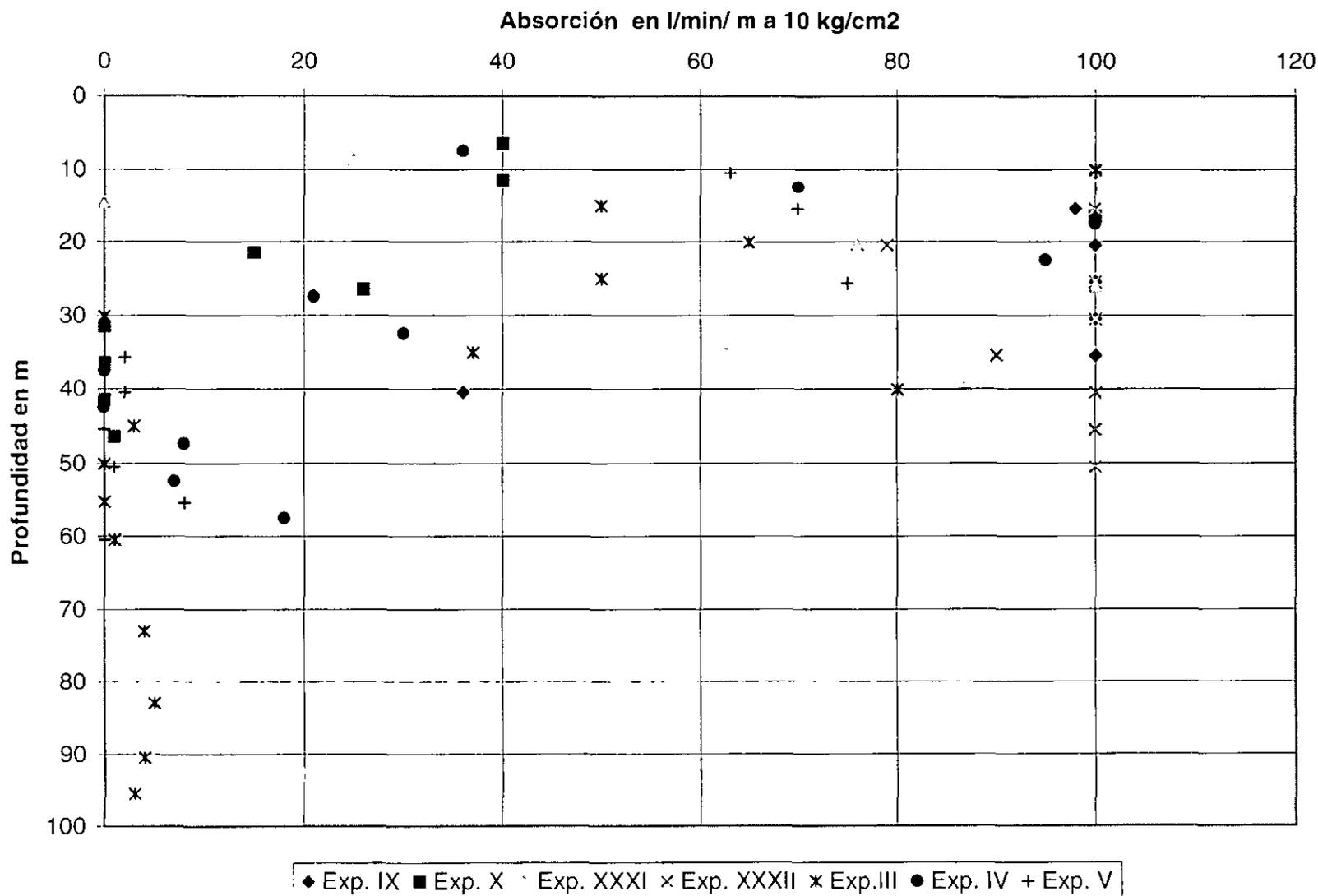
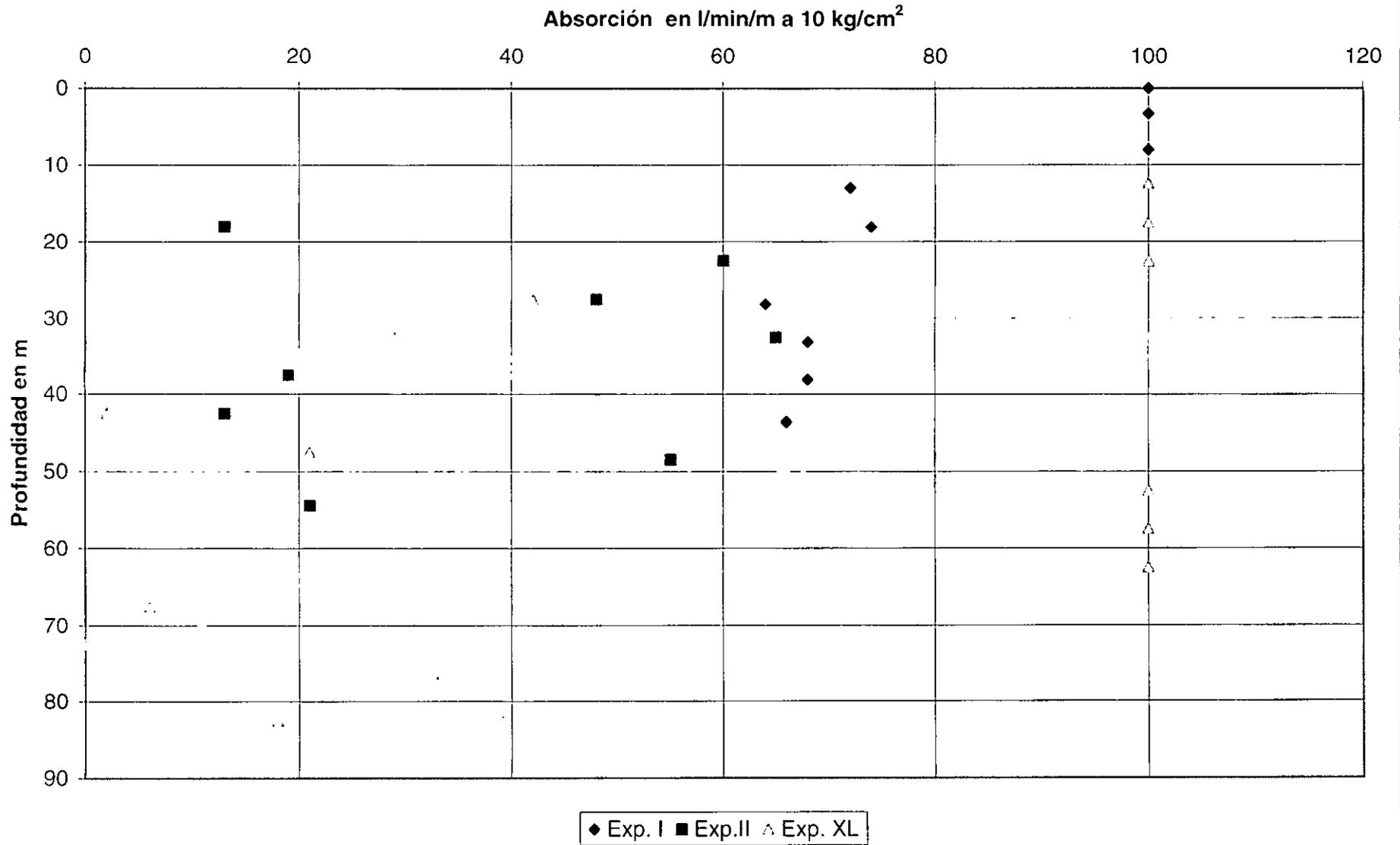


Fig. 20. ABSORCIÓN VS PROFUNDIDAD
MARGEN IZQUIERDA



que con las presiones aplicadas se provocaba el hidrofracturamiento de la roca, y por ello se elevaba tanto la absorción de agua en dichos tramos.

3.2 Exploraciones posteriores 1983 – 1995. CFE.

3.2.1 Estudios Geofísicos.

Se llevaron a cabo levantamientos de exploración geológica y geofísica con técnicas de resistividad eléctrica y tendidos sísmicos de refracción, definiendo así un modelo geológico - geofísico para el subsuelo.

En las secciones geológico geofísicas H-H' (Margen Derecha) e I-I' (Margen Izquierda), se pueden apreciar las tres unidades geofísicas que fueron determinadas y la ubicación de éstas, así mismo en la tabla 1, se indican los espesores de cada unidad y las características de resistividad y velocidad sísmica encontradas en ellas. Según esta tabla se puede concluir que tanto la Formación Balsas como el cuerpo intrusivo son rocas de mala calidad en superficie, pero al aumentar la profundidad, la calidad mejora llegando a ser buena en las rocas de la Formación Balsas.

<i>Unidad geofísica</i>	<i>Subunidad</i>	<i>Resistividad (ohm.m)</i>	<i>Velocidad asignada (km/s)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Correlación geológica</i>	<i>Características geomecánicas</i>
U ₁		9 – 260	0.3 - 0.8	Hasta 16	Suelo, rezaga y roca sumamente alterada	Mala Calidad
U ₂	U _{2B}	9 – 70	0.9 - 1.5	Hasta 20	Formación Balsas muy fracturada y alterada	Mala
	U _{2C}	28 – 85	2.2	84 o indeterminado	Balsas poco fracturada	Mala a regular
	U _{2D}	100 – 270	3.0 - 4.5	indeterminado	Balsas compactas y poco fracturada	Buena
U ₃	U _{3A}	80 – 452	0.9 - 1.5	Hasta 48	Intrusivo muy fracturado	Mala
	U _{3B}	130 - 470	3.0 - 3.2	Hasta 30	Intrusivo poco fracturado	Regular

Tabla No. 1. Unidades Geofísicas definidas en la zona de la obra.¹

¹ Referencia. C.F.E. Informe geológico, 1995.

3.2.2 Sistemas de Discontinuidades.

Los principales sistemas de discontinuidades que afectan a las diferentes rocas del sitio son cuatro; los cuales han sido denominados α , β , γ y δ . Estas familias se ilustraron en el estereograma de la figura 16 (capítulo 2) y sus características se señalan a continuación:

Sistema α (Estratificación).

La orientación que presenta es N 30° W; 14° SW; la continuidad que se observa varía entre 0.2 y 1.5 m, con un espaciamiento de 0.05 a 1 m. Aproximadamente el 23 % de las superficies analizadas están abiertas con espacio de 1 a 3 mm, su apariencia es principalmente rugosa y en menor proporción ondulada. Esta familia representa la estratificación de la Formación Balsas.

Sistema β .

Está orientado hacia el N 20° E y N 13° E, inclinado 65° al NW; los planos levantados presentan una continuidad de 0.1 a 6 m y un espaciamiento de 0.07 a 1 m; el 22 % de las fracturas se hallan abiertas de 1 a 3 mm y la apariencia de sus superficies de contacto es plana-rugosa. Esta familia afecta principalmente a las rocas de la serie volcánica Characharando.

Sistema γ .

Cuenta con una orientación variable de N 40° E / 88° SE, N 66° E / 24° NW y N 70° E / 64° NW, la continuidad medida varía de 0.1 a 2.5 m con un espaciamiento de 0.1 a 1 m; el 29 % de los planos analizados se encuentran abiertos de 1 a 5 mm, en ocasiones rellenos de calcita. Las superficies de contacto se observan planas-rugosas, estas discontinuidades afectan principalmente a las limolitas- areniscas de la Formación Balsas.

Sistema δ .

Se observa con orientación N 50° W inclinada de 82 a 88° SW, tienen una continuidad de 0.15 a 3 m y un espaciamiento de 0.1 a 1.5 m; el 21 % de las fracturas estudiadas se encuentran abiertas de 0.1 a 1 cm y sus superficies se observan de planas a rugosas. Esta familia corta al pórfido hipabisal y constituyen las superficies por las que se emplazan preferencialmente los diques.

La combinación de las cuatro familias de discontinuidades da lugar a la formación de bloques de forma tabular y prismáticas, con dimensiones variables de 0.10 a 2.5 m, cuya salida es principalmente es hacia el SW y NW, con un ángulo promedio de 47° y, en algunos casos, el mecanismo de falla es por volteo. En la tabla No. 3 se resumen las características mencionadas para cada familia.

<i>Sistema No de Datos analizados</i>	<i>Orientación</i>	<i>Espaciamiento (m)</i>	<i>Rugosidad</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Apertura</i>
α Estratificación (39)	N 30° W / 07-14° SW	0.05 a 1	Rugosa y ondulada	0.2 a 1.5	Abiertas de 1 a 3 mm debido al intemperismo
β Serie volcánica Characharando (154)	N 20° E / 65° NW y N 13° E / 65° SE	0.07 a 1	Planas – Rugosas	0.1 a 6	Abiertas superficialmente de 1 a 3 mm
γ Limolitas y areniscas (269)	N 40° E / 88-42° SE y N 66° E / 24° NW N 70° E / 64° NW	0.1 a 1	Planas – Rugosas	0.1 a 2.5	Abiertas parcialmente de 1 a 5 mm, en ocasiones rellenas de calcita y brecha hidrotermalizada
δ Pórfido hipabisal (770) y Diques (140)	N 50° W / 82-88° SW	0.1 a 1.5	Planas – Rugosas	0.15 a 3	Abiertas superficialmente de 0.1 a 1 cm en los primeros 2 m

Tabla No 3. Características del patrón estructural ¹

3.2.3 Índice de Calidad de Roca (RQD).

Margen Derecha

La recuperación obtenida en los cinco barrenos perforados en esta margen es en general buena; en los barrenos 1 y 2 se tiene una recuperación de casi el 100 %, mientras que en los barrenos 3, 4 y 5 la recuperación varía alrededor del 90 %. Solo en los tramos iniciales (5 a 10 m) de cada uno de ellos se tienen recuperaciones bajas, entre el 25 y 40 por ciento, esto puede deberse a lo descomprimido de la roca.

Los valores de calidad de roca (RQD) varían de muy mala a regular, a pesar de que la recuperación es buena en general, ya que los primeros tramos de los barrenos 1, 2 y 4 es menor del 50 %, mientras que en los barrenos 3 y 5 en su totalidad la calidad de roca varía de muy mala a mala.

En el caso de los barrenos 1, 2 y 4, el RQD aumenta con la profundidad y su valor varía de 60 a 70 %, lo que indica para estos tramos una calidad de roca regular, que en el caso del barreno 4 continúa hasta la profundidad perforada. En cambio en los barrenos 3 y 5, a la profundidad de 75 y 81 m respectivamente, el RQD tienen una baja considerable hasta el 22 y 30 %, que evidencia que la roca cortada es de muy mala y mala calidad, la cual sigue hasta el fondo de los dos barrenos. Cabe señalar que en los puntos mencionados se localiza el cambio litológico del Pórfido Andesítico a la formación Balsas; recordemos que ésta se compone de lutitas y

¹ Referencia. C.F.E. Informe geológico, 1995.

areniscas que presentan estratificación laminar a delgada y que el espesor de los estratos se encuentra entre los 5 y 30 cm, lo cual explica los bajos valores de RQD reportados, a pesar de haber obtenido muy buenos valores de porcentaje de recuperación.

La ubicación de los barrenos se observa en la figura No. 15; en las secciones (A-A' y B-B'. Plano PG-03) se pueden ver la localización de éstos y las unidades litológicas y geofísicas que cortan; además en la tabla No. 4 encontramos los resultados de permeabilidad y RQD para cada uno de los barrenos perforados en la margen derecha durante la campaña de 1983.

Margen Izquierda.

En esta margen los valores de recuperación son más variables que en la margen derecha; se tiene que en algunos barrenos (1, 2, 4, 6, 7P, 8P, 9P, 12P, 14, 14-13P, TP-15 y TC- 16) la recuperación es variable, alcanzando valores de 90 y 100%, mientras que en otros (3, 5, 10P, 11 y 11P) varían entre 40 y 70 %; al igual que en la margen derecha los primeros 5 a 10 m son los que tienen los porcentajes de recuperación más bajos. En cuanto a la relación entre la roca cortada y el valor de la recuperación, al parecer no es directa, ya que como pasa en la margen derecha los porcentajes de recuperación varían de manera similar tanto en las limolitas como en el pórfido.

Igualmente en los valores de RQD también se tienen variaciones; por ejemplo, en los barrenos 2, 3, 4-13P, 5, 6, 7P, 8P, 9P, 10P, 11, 11P y 12P, los valores de RQD en los tramos iniciales equivalen a una roca de muy mala a mala calidad; sin embargo en el caso del barreno 5 se observó que esta calidad de roca perduró durante toda la perforación, aunque existen algunos tramos de roca que alcanzan valores de RQD de 65 %, se nota un marcado dominio de valores bajos que varían entre 1 y 40 %.

En los barrenos 2, 3, 4-13P, 10P, 11, 11P y 12P se observa un predominio de tramos con calidad de roca mala a muy mala con intercalaciones de zonas con RQD de 57 a 70 %, que equivalen a una calidad de roca regular. La ubicación de estas rocas de mejor calidad no sigue un patrón definido en cuanto a la profundidad en que se hallan.

Existen tramos de buena calidad en los barrenos 6, 7P y 9P con un RQD variable entre 75 y 85 %; en el caso de los barrenos 7P y 9P, después de las zonas de buena calidad se tienen áreas de mala a muy mala calidad.

Únicamente en los barrenos 1 y 8P se logró cortar tramos con RQD del 90 %, representativos de roca de buena a excelente calidad. Sin embargo en el barreno 1 después de cortar casi 46 m de material de buena calidad, el RQD disminuye a 75 % indicando una calidad regular.

En todos los barrenos perforados en esta margen, predomina la presencia de la formación Balsas, que al presentarse en estratos delgados produce valores de RQD muy bajos; dichas rocas se encuentran afectada por la intrusión de diques; en las zonas de contacto las areniscas y lutitas presentan una alteración de tipo hidrotermal, lo cual contribuye a la disminución de los valores de RQD.

BNO. No	PROF. (m)	Tm-a				Tb				Observaciones
		Rec. (%)	RQD (%)	(U.L)	Clasif.	Rec. (%)	RQD (%)	(U.L)	Clasif.	
1	0 - 5									0 - 5 M Rezaga
	5 - 47	70	38	> 40	AP					
	47 - 90					96	41	3-11 (47 - 80 m) >40 (80 - 90 m)	PP AP	
2	0 - 63	87	52	10 - > 40*	AP					
	63 - 110					90	37	1 - 13	I - PP	
3	0 - 20	65	5	A						A = No fue posible realizar pruebas
	20 - 60					80	39	3 - > 40*	AP	
4	0 - 15.5	60	15	> 40	AP					
	15.5 - 60					95	69	>40 (17 - 32 m) <10 (32 - 45 m) >40 (45 - 60 m)	AP PP AP	
	0 - 20.5	63	15	A						A = No fue posible realizar pruebas
5	20.5 - 75					97	25	1 - 25	AP	

Tabla No 4. DATOS GEOTÉCNICOS DE LOS BARRENOS PERFORADOS EN 1983 EN LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA EL GALLO

Tb = Formación Balsas.

Tm-a = Pórido andesítico.

T-ia = Intrusivo Hipabisal.

CLASIFICACIÓN: I = Impermeable, PP = Poco Permeable, P = Permeable, MP = Muy Permeable, AP = Altamente Permeable.

A= No fue posible realizar pruebas por resurgencia del agua a la superficie

* = No incluye aquellas en que no levantó presión y/o no llega a 10 kg./cm²

Nota: Información basada en los datos del Anexo I

Para conocer la ubicación de los barrenos analizados recurrir a la figura 15, en las secciones A-A', D-D' e I-I' podemos observar la ubicación de los barrenos así como también las unidades litológicas y geofísicas que cortan, por último en la tabla No. 5 se encuentra un resumen de los datos expuestos anteriormente.

3.2.4 Pruebas de absorción de agua.

Para estas campañas efectuadas por la CFE, los resultados obtenidos en las pruebas de absorción de agua tipo Lugeon se agrupan en las tablas 4, 5 y 6 según la margen y campaña en que fueron realizadas.

En la tabla 6 se resumen los valores de absorción de agua obtenidos en las exploraciones de los años 92, 94 y 95 para las rocas de la Formación Balsas (Tb), los datos obtenidos corresponden a un terreno con grandes variaciones en sus discontinuidades (diques, fallas y fracturas), siendo la permeabilidad de esta unidad litológica de carácter primario y secundario, se considera que la permeabilidad primaria no es determinante en el comportamiento de la transmisibilidad hidráulica que presenta el terreno porque se observó poca porosidad en las rocas de la zona. Con respecto al cuerpo intrusivo, tabla 7, la permeabilidad es de tipo secundario, inducida por procesos de enfriamiento que ocasionaron diaclasamiento y decompresión, provocando el fracturamiento observado. Otro factor que afectó la permeabilidad de ambas unidades litológicas fue la alteración de tipo hidrotermal que sufrieron durante e inmediatamente después del emplazamiento de los diques (Ti-a)

<i>Permeabilidad</i>	<i>I</i>	<i>PP</i>	<i>P</i>	<i>MP</i>	<i>AP</i>	<i>Totales</i>
No de pruebas	30	23	20	12	32	117
%	25.64	19.65	17.09	10.25	27.35	100

Tabla 6 Resultados de la permeabilidad en las areniscas y limolitas, considerando todas las exploraciones de la Margen Izquierda.

<i>Permeabilidad</i>	<i>I</i>	<i>PP</i>	<i>P</i>	<i>MP</i>	<i>AP</i>	<i>Totales</i>
No de pruebas	6	7	3	2	6	24
%	25.00	29.17	12.5	8.33	25.00	100

Tabla 7 Resultados globales de la permeabilidad en los diques, considerando todas las exploraciones de la Margen Izquierda.¹

Explicación: I = Impermeable (0-3 U.L.) PP = Poco Permeable (3-11 U.L.);
 P = Permeable (11-25 U.L.) MP = Muy Permeable (25-40 U.L.)
 AP = Altamente Permeable (> 40 U.L.)

¹ Referencia C.F.E. Informe Geológico. 1995.

BNO. No.	PROF. (m)	Tb				Tm-a				OBSERVACIONES
		Rec. (%)	RQD (%)	U.L	Clasif.	Rec. (%)	RQD (%)	U.L	Clasif.	
1	0 - 65.8	90	82	3 - 30	AP					
2	0 - 6.5	80	40	A						A= No fue posible realizar pruebas
	6.5 - 11					92	67	A		A= No fue posible realizar pruebas
	11 - 41							25 - >40*	AP	
	41 - 55.85	100	87	0 - 5	I					
3	0 - 13					50	12	A		A= No fue posible realizar pruebas
	13 - 50.25	80	60	A						A= No fue posible realizar pruebas
4-13	2 - 21.15					71	49	>40*	AP	0 - 2 m Rezaga
	21.15 - 39	65	28	1	I					
				1 - 20	P - AP					
39 - 61.3					95	57	1 - 15	I - P		
5	3 - 12					15	0	A		0 - 3 m Rezaga
	12 - 31.5	55	40	20 - >40*	AP					
6	16 - 21	75	20	>40*	AP					0 - 16 m Rezaga
	21 - 30.05					100	78	1 - 3	I	
	30.05 - 35.05							10	PP	
7	5 - 55.45	88	60	0 - >40*	AP					0 - 5 m Rezaga
8P	3.2 - 31.05	95	84	10*(0 - 15m) 1(15-31.05 m)	AP I					0 - 3.2 m Arcilla y Rezaga
9P	0 - 21.2					75	40	A		A= No fue posible realizar pruebas
	21.2 - 78.05	85	70	>40* (0 - 44 m) 1-19 (44-78.05 m)	AP I - P					

Tabla No 5 . DATOS GEOTÉCNICOS DE LOS BARRENOS PERFORADOS ENTRE LOS AÑOS 1992 Y 1995, EN LA MARGEN IZQUIERDA DE LA PRESA "EL GALLO"

Tb= Formación Balsas

Tm-a = Pórido andesítico.

T- ia = Intrusivo Hipabisal.

CLASIFICACIÓN: I= Impermeable. PP= Poco Permeable, P= Permeable, MP= Muy Permeable, AP= Altamente Permeable.

* = No incluye aquellas en que no levantó presión y/o no llega a 10 kg./cm²

Nota: Información basada en los datos del Anexo II

BNO. No.	PROF. (m)	Tb				Tm-a				T-ia				OBSERVACIONES
		Rec. (%)	RQD (%)	(U.L)	Clasif.	Rec. (%)	RQD (%)	(U.L)	Clasif.	Rec. (%)	RQD (%)	(U.L)	Clasif.	
10 P	0 - 11.5					45	35	> 40	AP					
	11.5 - 29.15	57	34					> 40	AP					
	29.15 - 30.95							(cementado)						
	30.95 - 60.95									50	10	> 40	AP	
														Cementado
11 P	0 - 11.5	40	15	No se determinó										
	11.5 - 12.9									40	0	No se determinó		
	12.9 - 26.9	80	57	> 40*	AP									Pmáx = 3 y 4 Kg/cm ²
	26.9 - 31.85									97	66	> 40*	AP	Pmáx = 3 Kg/cm ²
	31.85 - 48.4	50	45	> 40*	AP									
	48.4 - 50.2									100	38	> 40*	AP	No levantó presión
11	0 - 23.83	55	15	> 40*	AP									
	23.83 - 24.75									58	10	1-2, 4	I	
12 P	1.5 - 36					75	55	> 40*	AP					0 - 1.5 m Rezaga
	36 - 40	100	75	> 40*	AP									
DF - 14	12 - 35.3	85	55	8 - 28	PP - MP									0 - 12 Rezaga Adame a 14 m
TP - 15	0 - 13	95	75					> 40*	AP					
	13 - 30.5									87	5	38 - 40*	AP	Cementado por caídos
	30.5 - 43					97	80	1 - 9	I - PP					
	43 - 50.2	100	70					1-8	I - PP					
TC - 16	3 - 22	80	17	>40* (3 - 18 m) B (18 - 22 m)	AP PP									0 - 3 Rezaga
	22 - 23									100	66	5	PP	De 21.8 - 23.1 Dique
	23 - 25.5	98	62	4	PP									
	25.5 - 27									100	66	3	I	De 25.3 - 27.2 Dique
	27 - 37	95	62	19	PP									

Continuación de la tabla No 5

CLASIFICACIÓN: I= Impermeable. PP= Poco Permeable, P= Permeable,
MP= Muy Permeable. AP= Altamente Permeable.

A= No fue posible realizar pruebas por resurgencia del agua a la superficie

* = No incluye aquellas en que no levantó presión y/o no llega a 10 kg./cm²

Nota: Información basada en los datos del Anexo II

Tb = Formación Balsas.

Tm-a = Pórido andesítico.

T-ia = Intrusivo Hipabisal.

3.3 Campaña 1997. CNA-CFE.

Como ya se mencionó, la construcción de la presa fue interrumpida en varias ocasiones, ocurriendo la última en 1995. Al continuar en 1997 con la construcción de la cortina, se efectuaron a lo largo de la pantalla seis perforaciones verticales con recuperación de núcleos y tres en el dique de contención; en estas perforaciones se efectuaron en forma sistemática pruebas de absorción de agua. Con esto se pretendía revisar la funcionalidad de la pantalla y determinar la permeabilidad residual después de la ejecución del inyectado. Las perforaciones de control demostraron que el subsuelo tenía todavía varios tramos con permeabilidad mediana a mayor (Anexo II). Esto provocó una discusión acerca de que si la pantalla de impermeabilización era funcional o si era necesario efectuarla de nuevo. Por tal razón se pidió a dos consultores internacionales su opinión sobre el tratamiento de la cimentación realizado, obteniendo los resultados que son citados a continuación:

3.3.1 Opinión de consultores externos

Don W. Deere PE., PG.

Al revisar los resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas en la cimentación observó que las pruebas Lugeon localmente resultaron con valores de permeabilidad generalmente bastante elevados (40 UL aproximadamente), pero que estos se debieron a hidrofracturamiento. Las pruebas Lefranc a presiones mucho más bajas indican permeabilidades en la parte superior de la cimentación entre 10^{-4} y 10^{-6} cm/s con un valor típico de 10^{-5} cm/s.

En resumen, se pueden calificar las condiciones de la cimentación de regulares a pobres. La cimentación muestra condiciones de resistencia y deformabilidad adecuadas, pero las permeabilidades son localmente altas y problemáticas con valor de 10^{-4} cm/s.

Al examinar el programa de inyección realizado se observa que en general las tomas de lechada en los barrenos primarios y secundarios fueron de moderadas a moderadamente elevadas definidas según el sistema desarrollado por D.U. Deere, (que se muestra a continuación) y en algunos casos parece que el inyectado no fue terminado.

<i>kg de cemento/m de perforación</i>	<i>Calificación</i>
0 - 25	Bajo
25 - 50	Moderadamente bajo
50 - 100	Moderado
100 - 200	Moderadamente elevado
200 - 400	Elevado
> 400	Muy elevado

Tabla 8. Calificación de las tomas de inyección según Deere.

Por lo cual se recomendó terminar el programa sistemático de inyectado, principalmente en las áreas donde los consumos fueron elevados ($> 100 \text{ kg/m}$) para así proporcionar un cierre de la pantalla y del tapete de consolidación. Para lograr esto se sugirió emplear mezclas estables, es decir, con relaciones agua-cemento A:C 0.8:1 con el porcentaje adecuado de superfluidizante sin bentonita. También fue propuesto el empleo del método GIN, además de graficarse las presiones con relación a las tomas en el campo y suspenderse el inyectado cuando las gráficas indicaran hidrofracturamiento.

Prof. Dr. F.K. Ewert.

1. Caso presa "El Gallo".

La revisión de los datos proporcionados indican una distribución de permeabilidades muy heterogénea, ya que están representados todos los grupos, pero de una manera no uniforme: los grupos 3-11 UL y $>40 \text{ UL}$ predominan; por ello solo es posible estimar de manera cualitativa la permeabilidad del macizo, quedando de la siguiente manera:

- Aproximadamente la cuarta parte de todos los ensayos se efectuó en tramos del macizo que prácticamente son impermeables (0-3 UL).
- Los tramos del macizo con poca permeabilidad (3-11 UL) que se obtienen por diaclasas angostas tienen una proporción similar.
- Otra cuarta parte de los ensayos presentó permeabilidades medianas a mayores (11-40 UL), son causadas, ya sea por muchas juntas estrechas o por juntas individuales de una abertura mayor. Sin embargo, debe suponerse que estas permeabilidades fueron simuladas, por lo menos parcialmente, en una parte de los ensayos por dilatación de juntas o fracturamiento.
- Lo último es probablemente válido también para una parte de los ensayos del último grupo ($>40 \text{ UL}$), a la cual pertenecen también aquellos tramos que encontraron diaclasas individuales más abiertas.

En lo que se refiere a la inyectabilidad del macizo, éste tiene una estratificación muy marcada y ya que la resistencia transversal a los planos de estratificación no es elevada, el macizo tiene facilidad de fracturamiento a lo largo de los planos de estratificación. En las pruebas de perforaciones de control se demostró que las capas ya se fracturan a bajas presiones –orden de magnitud: 5 bar – y que estas presiones críticas no aumentan a profundidad. Consecuentemente, el macizo solo tiene una inyectabilidad mala. Esto causa, que solo se puedan inyectar las diaclasas verticales con gran apertura y que todas las diaclasas cerradas o finas subverticales prácticamente no son inyectables. Con un inyectado continuo resulta un fracturamiento de los planos de estratificación, por lo cual las fisuras finas no inyectadas provocan una permeabilidad residual, que debe de aceptarse.

2. Opinión acerca del inyectado y de la permeabilidad después del inyectado.

Las cantidades inyectadas varían considerablemente y tienen un rango entre 0 kg/m y $>600 \text{ kg/m}$; además, se presentan grandes diferencias por tramos. Es de suponerse que una gran

parte de los volúmenes grandes inyectados no fue debida a la presencia de conductos de agua reales, sino al relleno de juntas formadas por fracturamiento.

De la evaluación de las pruebas de absorción de agua en las perforaciones de control recién ejecutadas resultó que la pantalla tiene una permeabilidad residual considerable; sin embargo con el inyectado se logró una reducción parcial de la permeabilidad, ya que aproximadamente el 70% de los valores eran originalmente mayores. La distribución del 30% restante queda incierta, ya que los valores indicados para la permeabilidad natural >40 UL, puede ser poco o mucho mayores que 40 UL. De todos modos se puede determinar en conjunto una reducción de la permeabilidad.

3. Programa de investigación

Para poder determinar de que orden de magnitud es la permeabilidad residual y si realmente valdría la pena un nuevo programa de inyectado, se recomendó un programa de investigación que incluía las siguientes especificaciones:

- 1) La elaboración de diagramas P/Q, para determinar la permeabilidad natural, las modificaciones de la permeabilidad por la presión y las presiones críticas.
- 2) La inyección de manera ascendente de las perforaciones de control BC-1, BC-2, BC-3, BC-7, BC-8 y BC-9. En este caso se seleccionaron los mismos tramos que se utilizaron en los ensayos de absorción de agua.

El inyectado en cada progresión debía efectuarse en dos fases, para investigar como es la inyectabilidad natural:

- En la primera fase debía aplicarse una presión efectiva baja (6 kg/cm^2), para evitar el fracturamiento del macizo y para inyectar solo los huecos naturales.
- Al final de la primera fase debía interrumpirse el proceso de inyectado por aproximadamente 5 minutos.
- En la segunda fase se debía continuar la inyección después de haber excedido la presión crítica con una presión mayor por aproximadamente 20 minutos y luego suspender.

3.3.2 Análisis del autor.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas realizadas en los barrenos perforados en la campaña de 1997, mostraban la existencia de varios tramos con permeabilidades altas, entre 20 y 30 U.L, hasta valores mayores de 40 U.L, por lo cual se retomaron estos datos realizando un nuevo análisis con el fin de obtener una reinterpretación de estas pruebas, obteniendo los siguientes resultados:

Primero se realizó un análisis por tramos de cada uno de los barrenos graficando la absorción en l/min/m contra la presión en kg/cm^2 : En estas gráficas se aprecia fácilmente el comportamiento de la roca durante la prueba, incluyendo el momento del hidrofracturamiento de la misma. Esto se presenta en las figuras 21 y 22 para la margen derecha, 23 y 24 para la zona del cauce y la figura 25 para la margen izquierda; en todos los tramos, a excepción de uno

MARGEN IZQUIERDA BARRENO BC-7

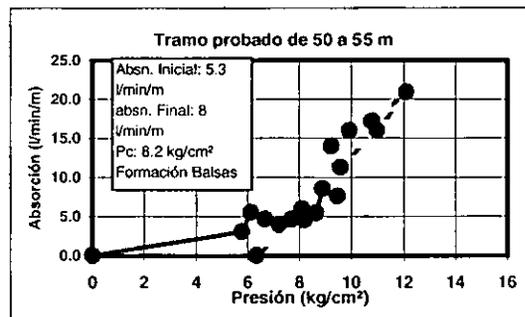
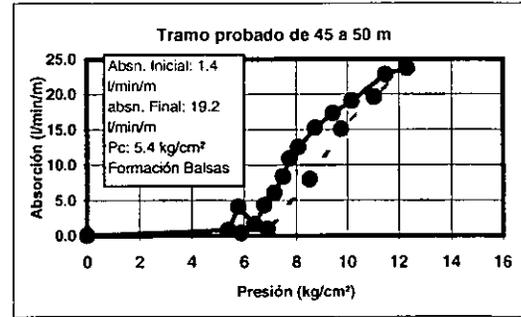
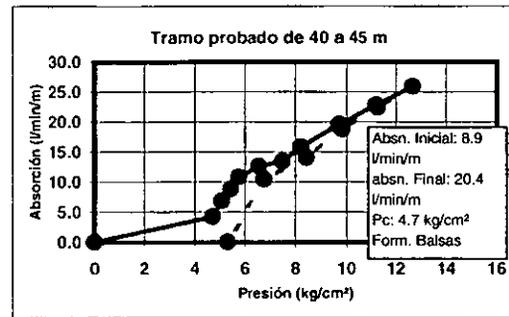
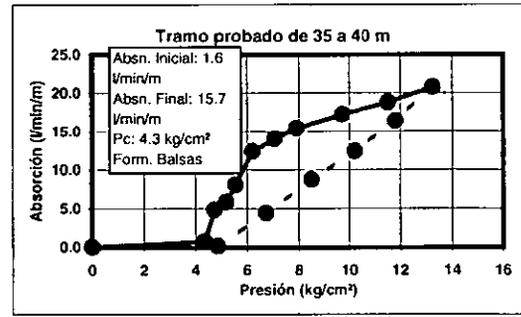
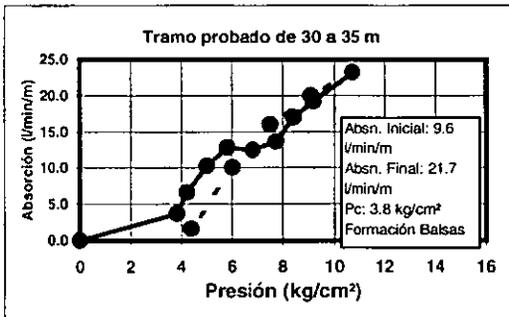
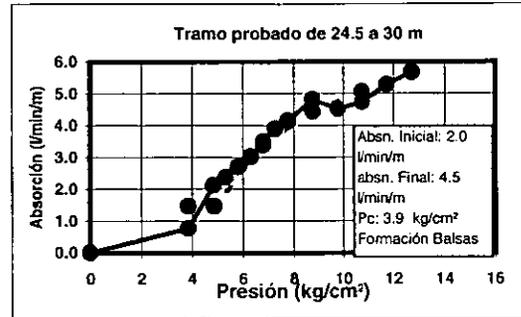
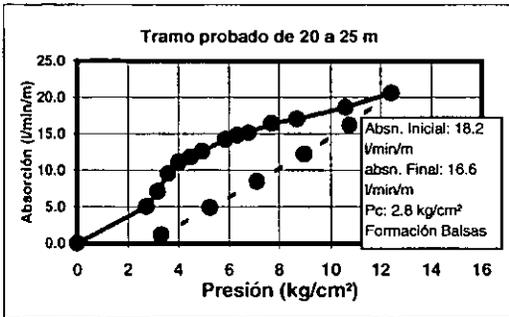
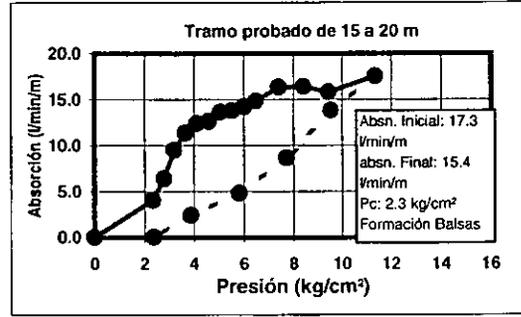
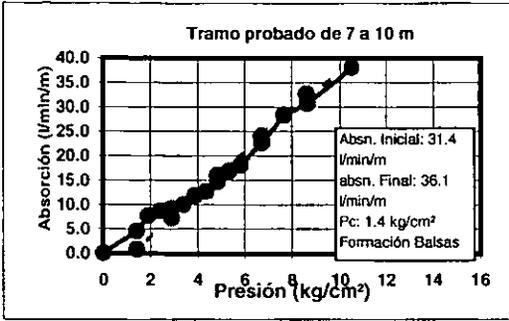


Fig. 21

MARGEN IZQUIERDA BARRENO BC-8

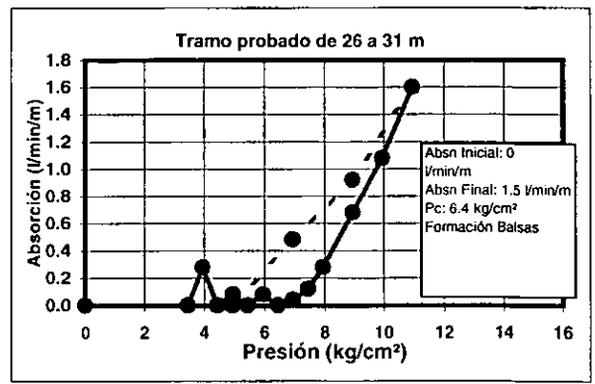
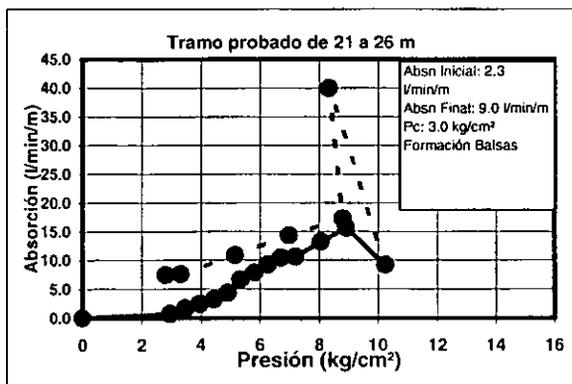
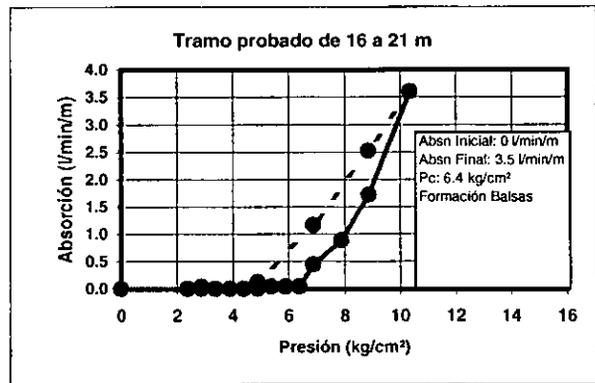
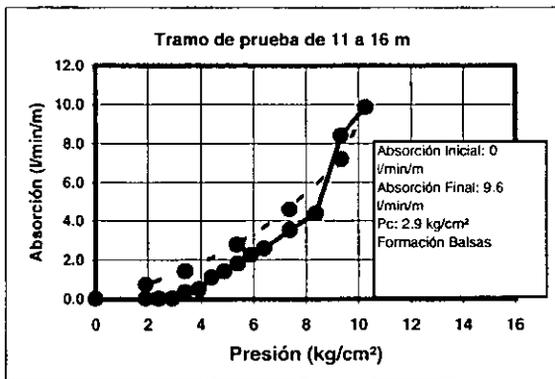
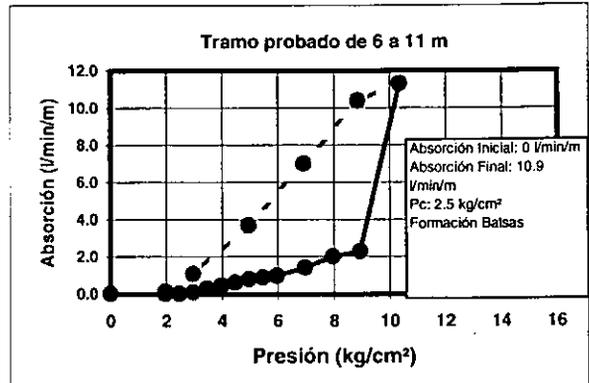
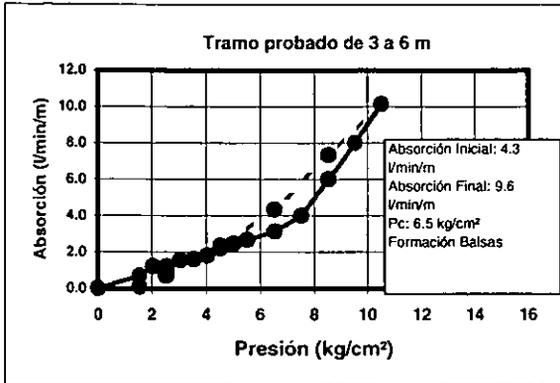


Fig. 22

MARGEN IZQUIERDA BARRENO BC-8

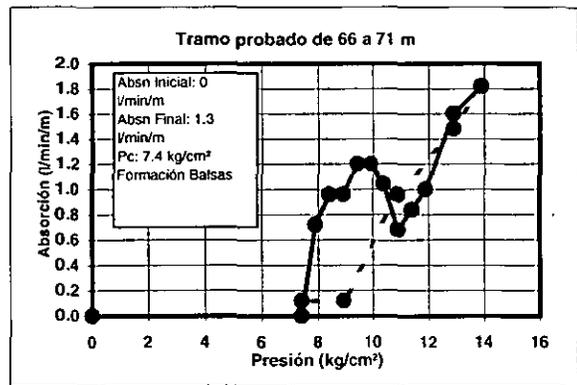
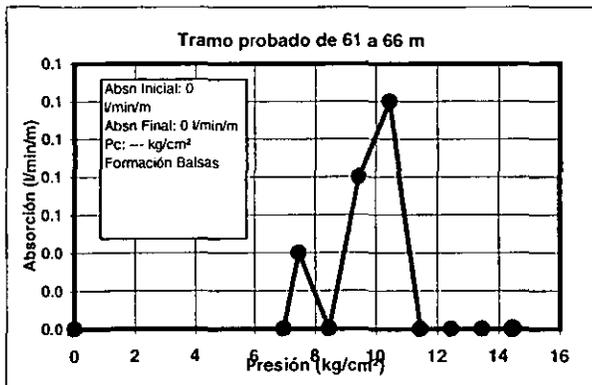
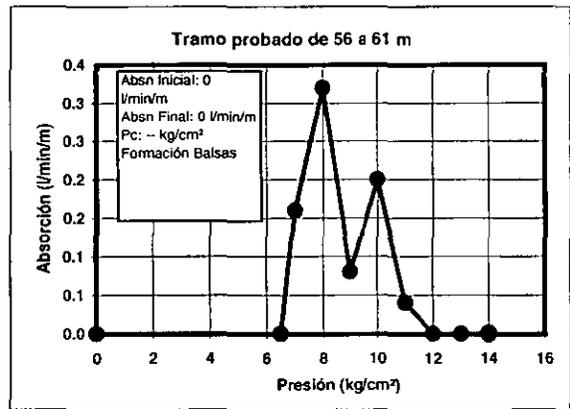
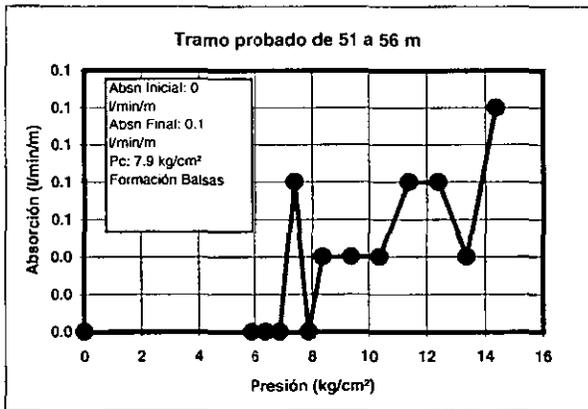
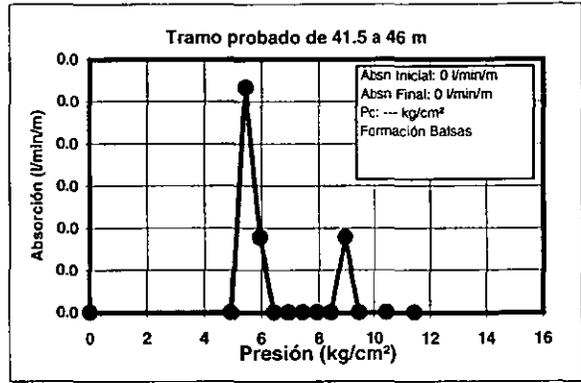
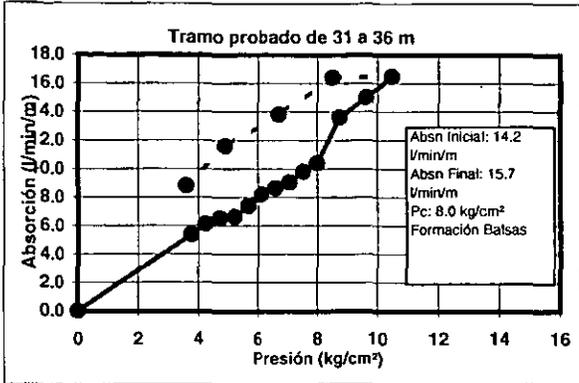


Fig. 22

ZONA DEL CAUCE BARRENO BC-2

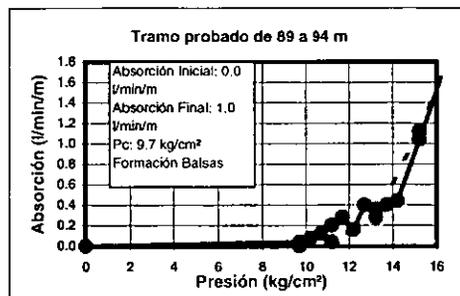
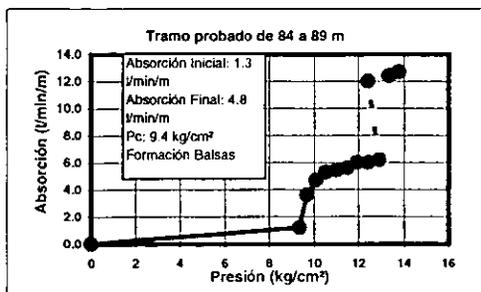
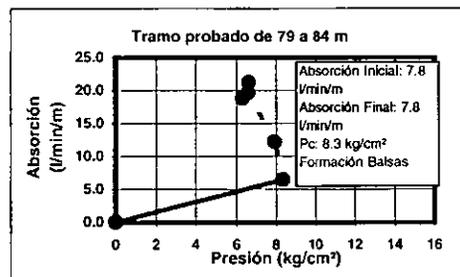
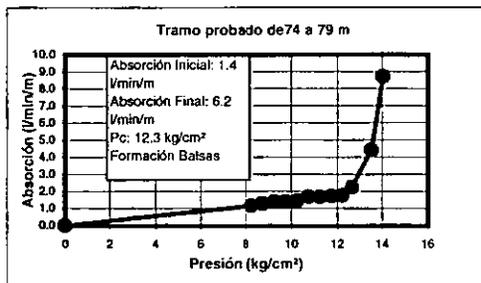
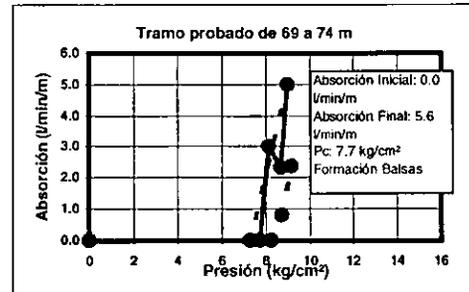
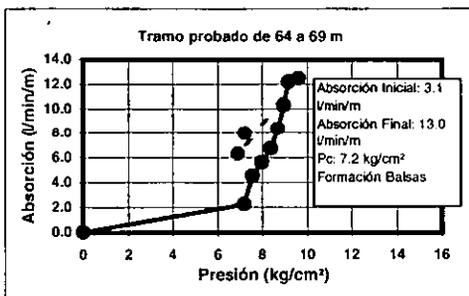
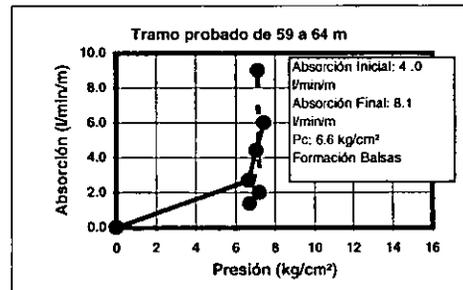
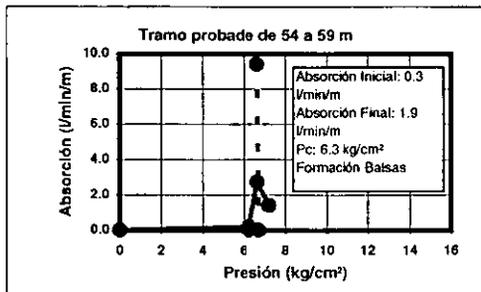
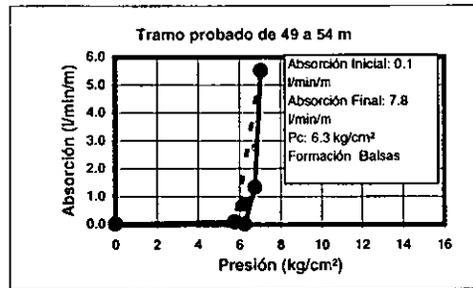
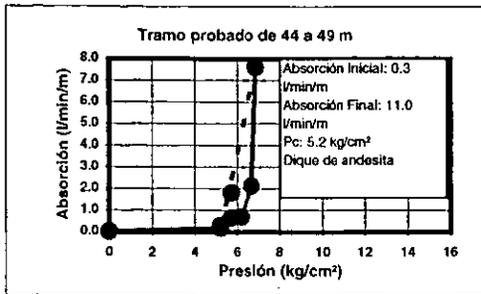


Fig. 23

ZONA DEL CAUCE BARRENO BC-3

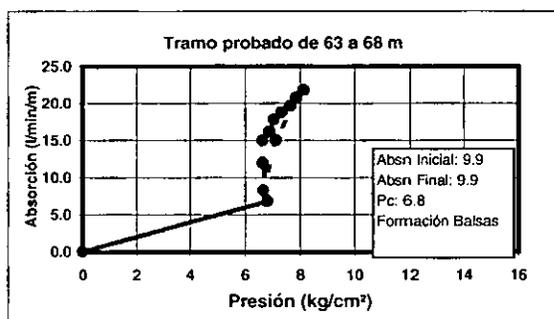
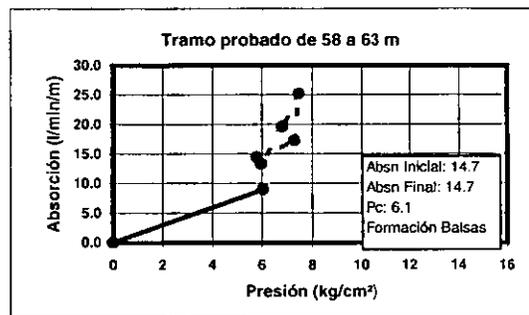
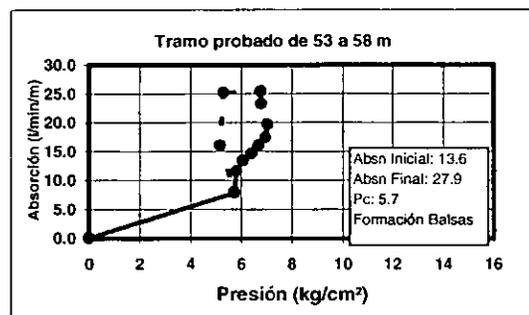
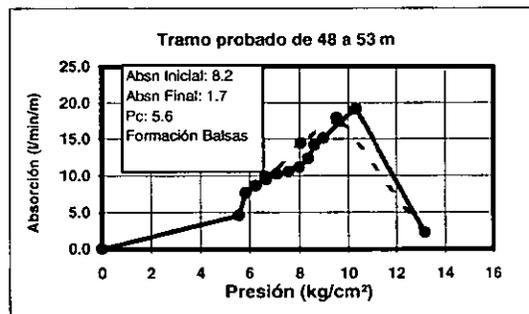
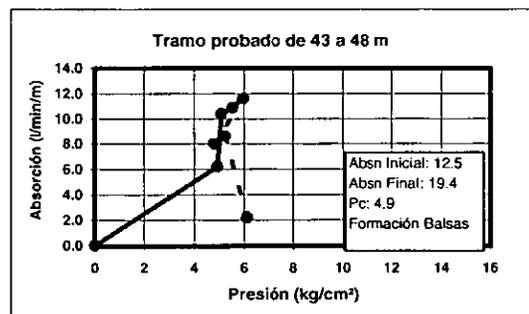
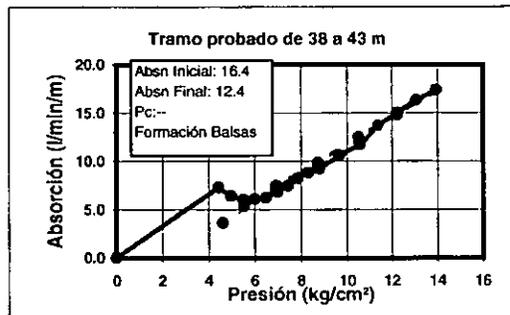
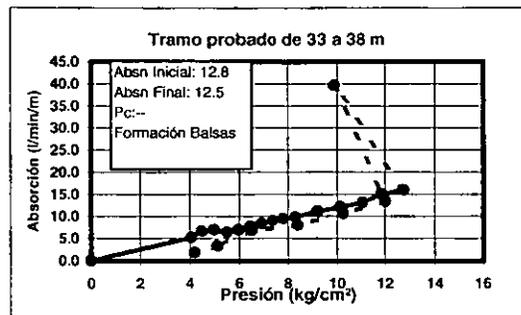
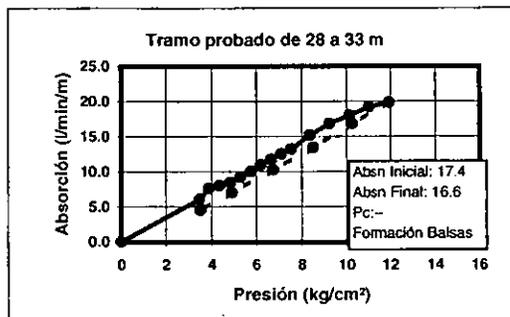
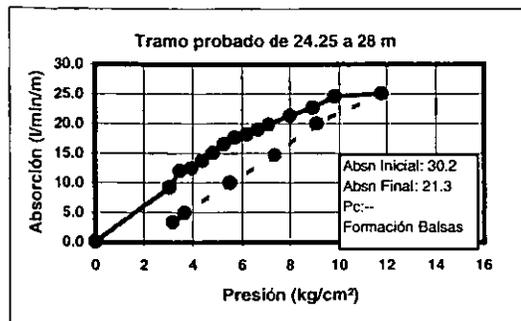


Fig. 24

MARGEN DERECHA BARRENO BC-1

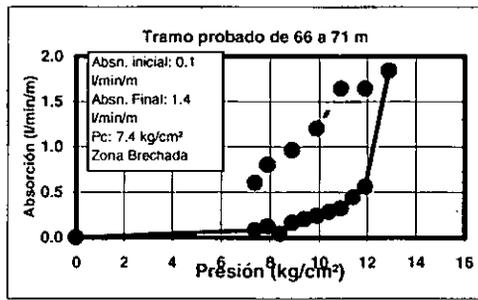
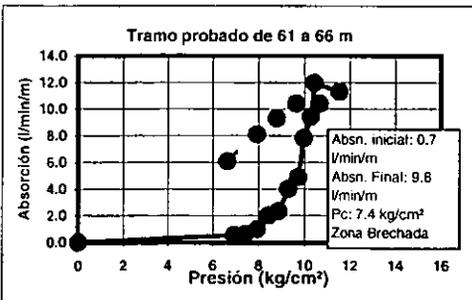
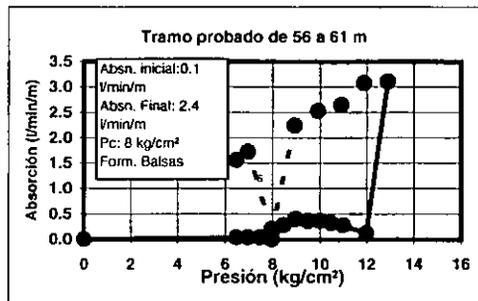
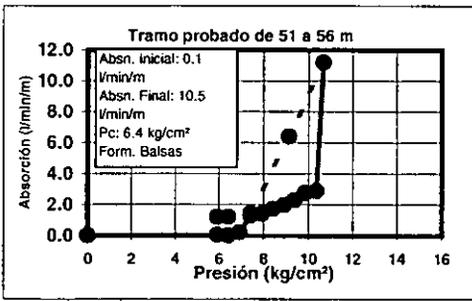
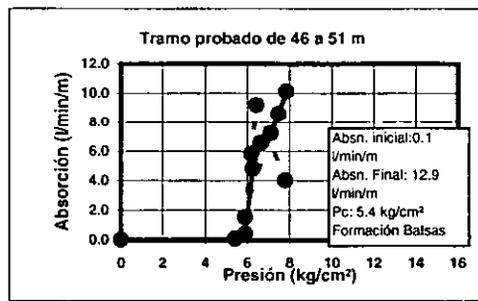
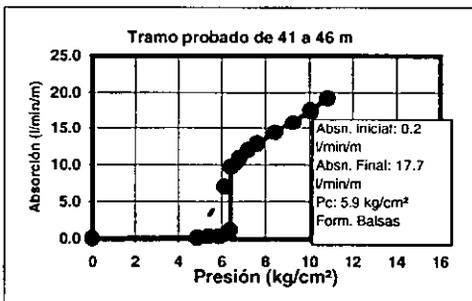
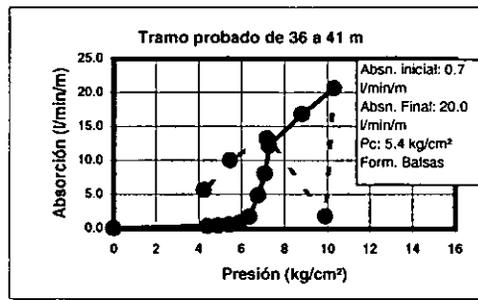
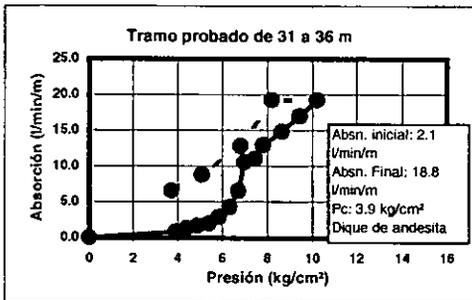
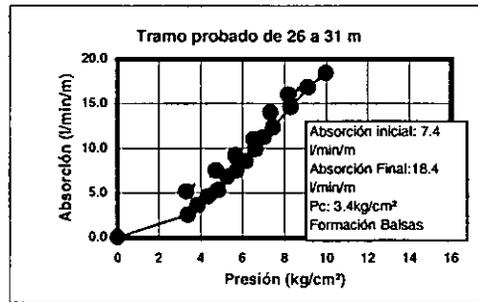
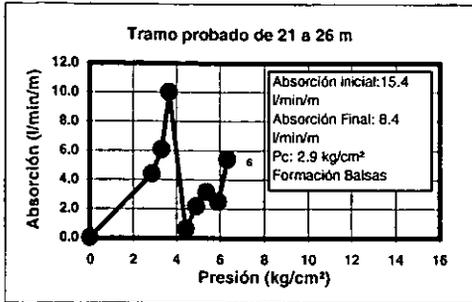


Fig. 25

del barreno BC-2, todos los valores de presión crítica encontrados son menores a los 10 kg/cm², por lo cual al alcanzar la presión que define la unidad Lugeon, ya se había rebasado la presión crítica de la roca, provocando el hidrofracturamiento de ésta. Lo que demuestra que en la mayoría de los casos la absorción inicial de la roca, antes de llegar a su presión crítica, era muy baja quedando en los rangos de impermeable a poco permeable. Concluyendo así que las rocas encontradas en el sitio, son rocas de poca permeabilidad, pero con presiones críticas bajas, por lo cual los valores de alta permeabilidad reportados en los histogramas del Anexo II, son resultado del hidrofracturamiento de la roca.

Finalmente en la figura 26 se muestra la gráfica de la presión crítica contra la profundidad para toda la zona de la boquilla, podemos ver que la tendencia en todas ellas es de que la presión crítica aumenta con la profundidad, lo cual indica un mejoramiento en la calidad de la roca con la profundidad. También se presentan las presiones manométricas empleada en los trabajos de inyección y se observa que éstas fueron mayores a la presión crítica de la roca en todos los casos; sin embargo esto se analizará más a fondo en el capítulo 4 donde se explican los tratamientos de inyección realizados en la cimentación.

3.4 Caracterización del Macizo Rocoso.

Para caracterizar el macizo rocoso en la zona de interés, se utilizaron los datos de las discontinuidades aledañas a las zonas de obra de toma y de conducción, además del valor de RQD promedio de los barrenos más cercanos.

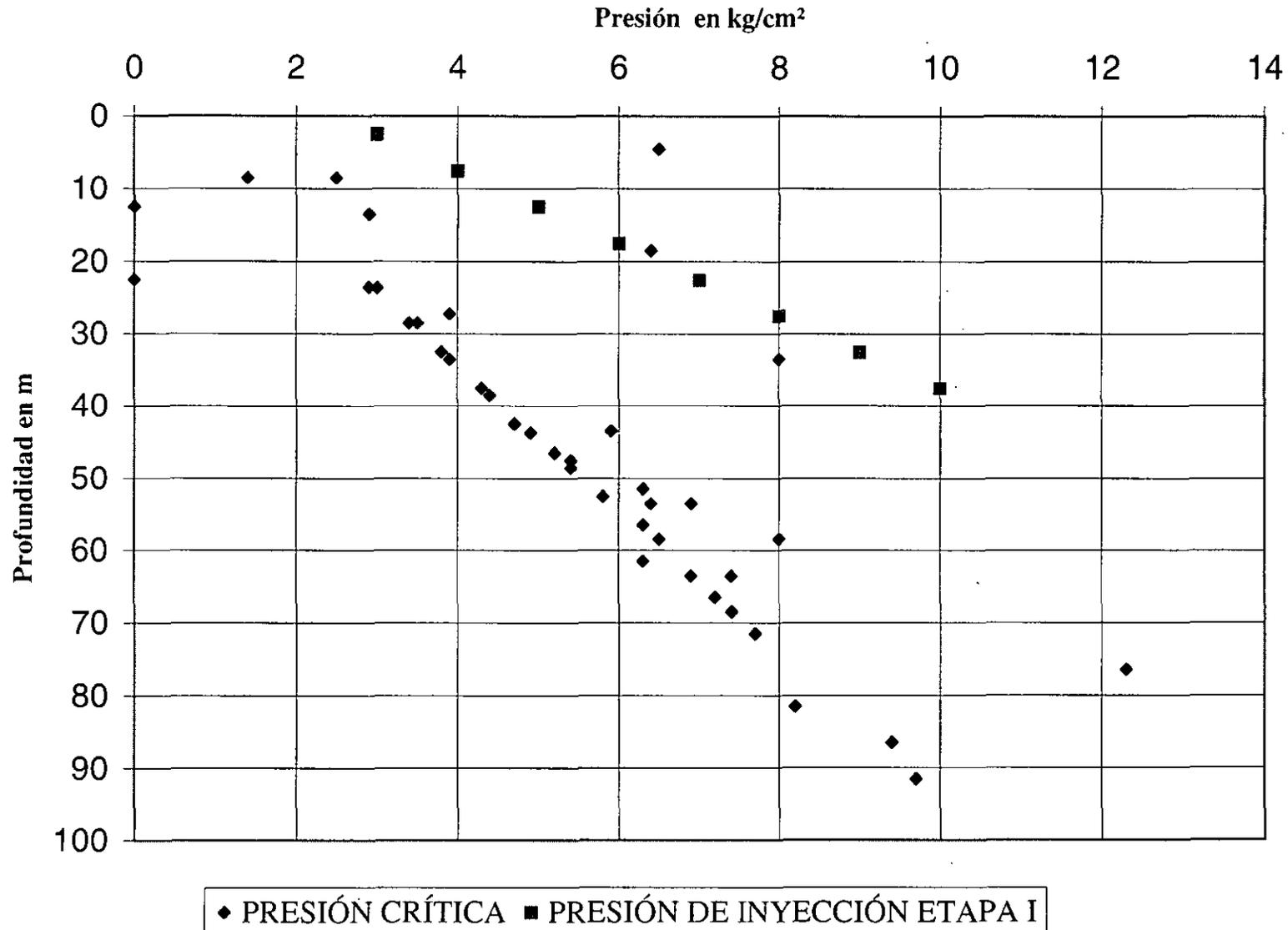
Para la zona de obra de toma se empleó el RQD promedio de los barrenos 1, TC-16 y 8P, mientras que para la zona de conducción se tomaron en cuenta los barrenos 7P y TP-15.

Para la caracterización del macizo rocoso se eligió la clasificación de Barton, Lien y Lunde (1985), el cual propone el empleo de seis parámetros para definir un índice de calidad "Q", para las excavaciones subterráneas, cuyo significado se muestra en la tabla No 9, estos parámetros son ligados por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Los parámetros obtenidos son muy similares en toda el área analizada, ya que se trata de una misma unidad geológica, a excepción de los índices de calidad de la roca influenciados por cuerpos intrusivos o en donde se detectaron condiciones de saturación, como sucede en la casa de máquinas, sin embargo para la clasificación del macizo estos no fueron tomados en cuenta ya que la construcción de ésta será exterior.

Fig. 26. PRESIÓN VS PROFUNDIDAD
ZONA DE LA BOQUILLA



<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Descripción</i>
Calidad de Roca	RQD _{OT} = 73.33 RQD _C = 67.75	Principalmente en las areniscas y limolitas
Número de familia de fisuras	J _n = 6	Dos sistemas de fisuras más una aislada
Rugosidad	J _r = 1.5	Rugosas e irregulares pero planas
Alteración y Relleno de Juntas	J _a = 3.0	Paredes cubiertas con relleno arcillo-arenoso que no pierde resistencia con la deformación.
Condiciones de Flujo de Agua	J _{wOT,C} = 1.0	Ambiente seco o fluido, por ejemplo <5 l/min localmente. Infiltración o presión medianas, con lavado ocasional de los rellenos
Condiciones de Esfuerzos	SRF = 5.0	Zonas de debilidad aislada, conteniendo arcilla o roca desintegradas químicamente a una profundidad < de 50 m.

Explicación: RQD_{OT} = RQD Obra de toma; RQD_C = RQD Zona de conducción

Tabla No. 9 Parámetros para la caracterización del macizo en la zona de obras¹

El número de familias se obtuvo a partir del análisis de los datos de las discontinuidades tomadas en campo y la rugosidad por las características de éstas; los resultados fueron utilizados para darle los valores de la tabla propuesta por Barton.

Sustituyendo los valores de los parámetros anteriores en la ecuación para el cálculo de "Q", se obtiene lo siguiente:

$$Q_{OT} = \frac{73.33}{6} \frac{1.5}{3} \frac{1}{5} = 1.22$$

$$Q_C = \frac{67.75}{6} \frac{1.5}{3} \frac{1}{5} = 1.129$$

Con los valores de "Q" así obtenidos, el macizo rocoso se clasifica de la siguiente manera:

En la Obra de Toma el valor de 1.22 obtenido corresponde a un macizo con mala calidad para teneleo, al igual que en la zona de conducción en donde se obtuvo un índice de calidad de 1.129.

Esta caracterización del macizo rocoso sirvió para dar una idea de las medidas necesarias para la excavación de los túneles y construcción de las obras.

¹ Referencia C.F.E. Informe Geológico. 1995.

CAPÍTULO 4 **TRATAMIENTOS DE CIMENTACIÓN.**

El tratamiento de cimentación se refiere a la serie de actividades que se requieren realizar para preparar el área en donde se desplantará la presa. Esas actividades dependen por un lado de las condiciones geológicas del sitio y por el otro, del tipo de cortina que se construirá. El objetivo principal de un tratamiento de cimentación es el de tratar de lograr una superficie de apoyo estable, de baja deformabilidad e impermeable con el objeto de poder garantizar la seguridad y funcionalidad de la obra.

Antes de ello es necesario comprobar si las rocas de la zona en estudio son inyectables o no. Para esto se aplican diversos criterios. Frecuentemente se evalúa la inyectabilidad de una roca según la magnitud de los valores de absorción de las pruebas tipo Lugeon; sin embargo hay que tomar en cuenta, que las pruebas de absorción de agua determinan solo una propiedad de capacidad de absorción de agua, mientras que las suspensiones de cemento poseen propiedades reológicas totalmente distintas que las del agua. Esto explica por qué generalmente no existe una correlación entre la cantidad del agua inyectada durante la prueba y las cantidades de cemento inyectadas.

Además es importante tener un conocimiento preciso de la geometría de los posibles conductos de flujo en la roca, ya que las juntas con aperturas grandes pueden inyectarse bien, las juntas medianas solamente pueden ser inyectadas parcialmente y las juntas muy cerradas nunca se podrán inyectar con un cemento normal, aún cuando las cantidades de inyección sean elevadas.

Otro factor que influye de manera importante en la inyectabilidad es, la presión de inyectado. Ha sido demostrado por muchos experimentos (F.K. Ewert y G. Lombardi), que existe una relación entre la presión requerida para que pueda penetrar una mezcla de cemento en una junta y su apertura: en cuanto menor sea la abertura de la junta, tanto mayor deberá ser la presión, para que la suspensión pueda penetrar una distancia suficiente desde la perforación en una junta. Pero no toda roca debe inyectarse a alta presión ya que las rocas menos compactas se rompen y esto provoca a veces una permeabilidad secundaria adicional, que tampoco se puede tratar.

4.1 Tratamientos de cimentación realizados en la presa “El Gallo”.

Para el desplante de la cortina se llevó acabo una limpia general de la superficie del terreno dentro de las trazas exteriores removiendo todo el material suelto o alterado y los aluviones del cauce. A fin de alcanzar una formación geológica sana se excavó una trinchera en el aluvión de profundidad variable hasta alcanzar la Formación Balsas, en la que el ancho de la plantilla se fijó en razón de la traza del material impermeable y filtros; los taludes de esta trinchera se excavaron de acuerdo a la estabilidad del terreno. Posteriormente se limpió la superficie de la roca cuidadosamente con agua y aire a presión y se impermeabilizaron las juntas abiertas con mortero. Encima de ésta superficie se colocó una capa de concreto de apoyo con un espesor de 0.5 m, para lograr una superficie uniforme de contacto con el núcleo

de arcilla. A partir de la superficie de esta capa de concreto se efectuaron las perforaciones de inyectado para el tapete de consolidación y la pantalla impermeable.

4.2 Tapete de consolidación

Entre las estaciones 0 -025 - 0 + 440 se efectuó el tapete de consolidación, con el fin de preparar el área para la colocación del material del núcleo, perforándose 580 barrenos hasta una profundidad de 10 m en una cuadrícula de 10 por 10 m distribuidos en cinco etapas, éstos fueron inyectados con lechada de agua - cemento en dos progresiones ascendentes de 5 m de longitud cada una, cerrando la cuadrícula en varias etapas cuando el consumo de cemento excedía 50 kg/m. Se emplearon mezclas con relación Agua:Cemento de 3:1 y 2:1 llegando hasta 1:1 y 0.8:1 (A:C). La mezcla contenía 5 % de bentonita reducido al 2 % para relaciones A:C menores. Se iniciaba con la mezcla más fluida y se espesaba cada vez que la toma aumentaba otros 50 kg de cemento por metro de perforación (Fotos 9 y 10).

Las presiones empleadas para el inyectado fueron moderadas; los barrenos primarios de consolidación se inyectaron a 1.15 veces la presión de sobrecarga del terreno hasta 2.3 veces de la misma en los barrenos de etapas subsiguientes (tabla 10).

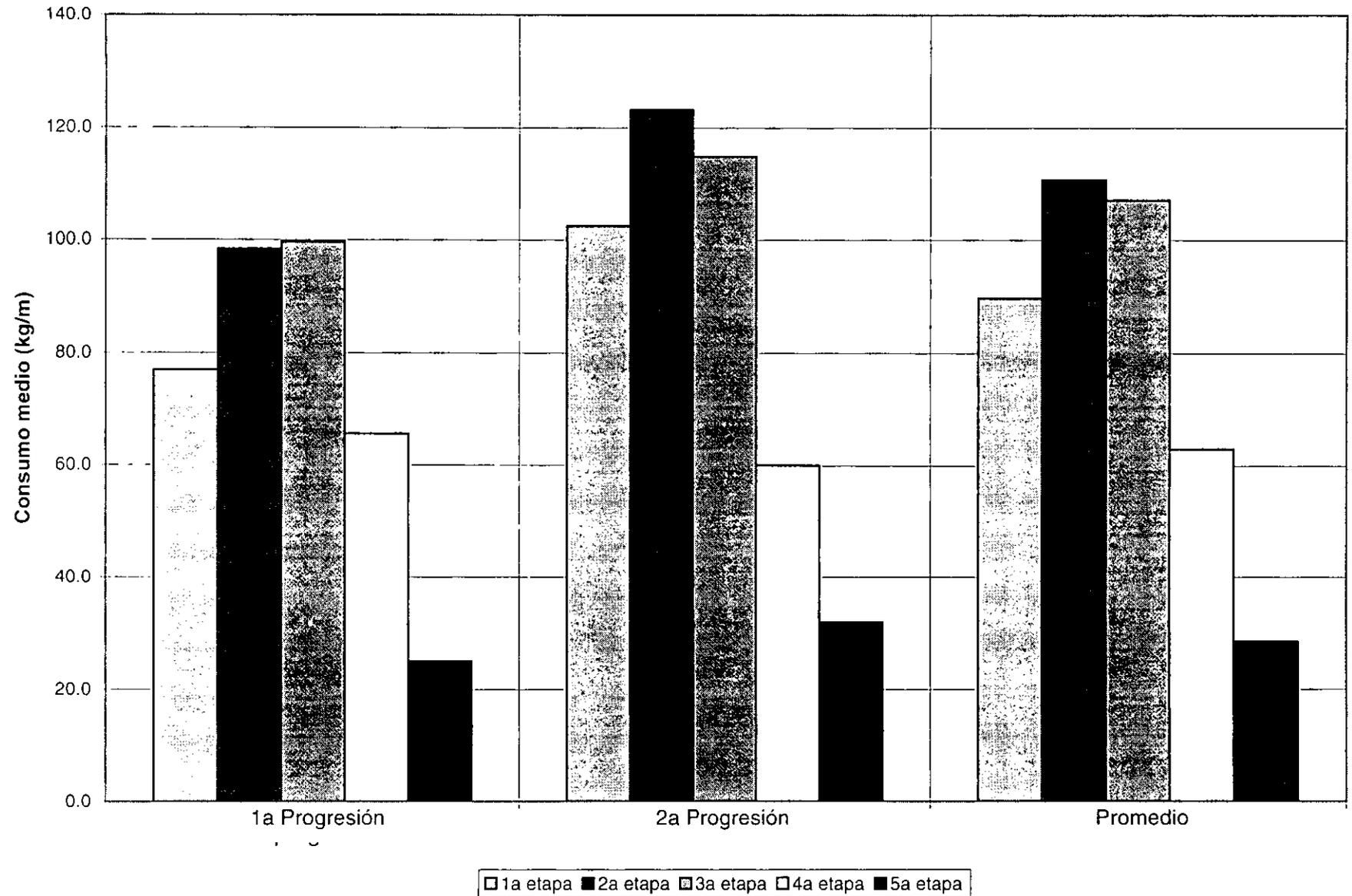
<i>Progresión</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Presión manométrica I etapa</i>	<i>Presión manométrica II etapa</i>
1a	0-5	2.0	3.0
2a	5-10	3.0	4.5

Tabla No. 10. Presiones de inyectado en la carpeta de consolidación. ¹

En general, los consumos en el tratamiento del tapete de consolidación quedaron en los rangos de moderadamente bajos (28.5 kg/m) a moderadamente elevados (110.8 kg/m). Fig. 27. En ambas progresiones el aumento más significativo se encuentra entre la primera y segunda etapa, Este incremento en el consumo indica que no se había logrado un cierre en la formación, y que las presiones utilizadas fueron muy altas propiciando así el hidrofracturamiento de la roca.

¹ Referencia. Reporte técnico C.N.A Tratamiento de la cimentación, presa "El Gallo" 1990)

Fig. 27. RESUMEN TAPETE DE CONSOLIDACIÓN



4.3 Pantalla impermeable.

La construcción de una pantalla de inyectado parte de la suposición, que durante el inyectado se forma teóricamente un volumen de afectación cilíndrico alrededor de cada perforación. Cuando se colocan las perforaciones en serie sobre una línea con una distancia constante de tal forma que se traslapen sus cilindros de influencia, se espera lograr un cuerpo tabular de roca inyectada, que representa la pantalla de inyecciones.

En el proyecto "El Gallo", se efectuó una pantalla impermeable mediante tres líneas de inyectado, una línea coincidiendo con la traza del eje de la corona (línea "F") y otras dos líneas a ambos lados, aguas arriba (línea "G") y aguas abajo (línea "E"). Primero se inyectaron las líneas externas para establecer una zona confinada lateralmente y al final se inyectó la línea central. Esto se realizó únicamente en la zona del cauce entre las estaciones 0 + 105 y 0 + 220 y en el resto de la cortina se ejecutó una sola línea de pantalla. Esto se representa de manera esquemática en la figura 28 junto con el tapete de consolidación

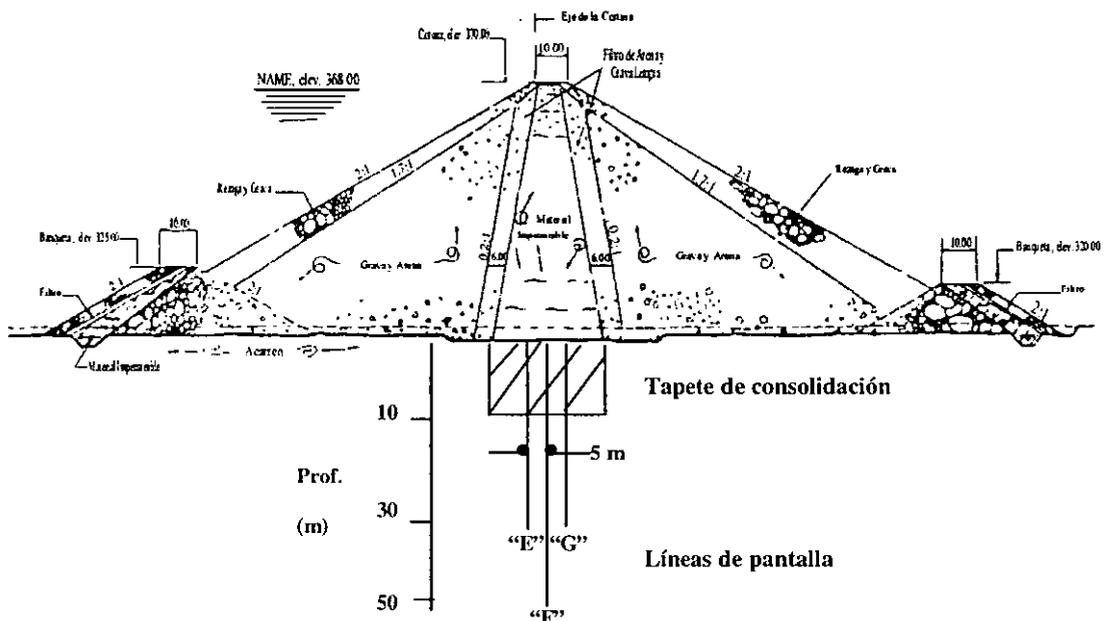
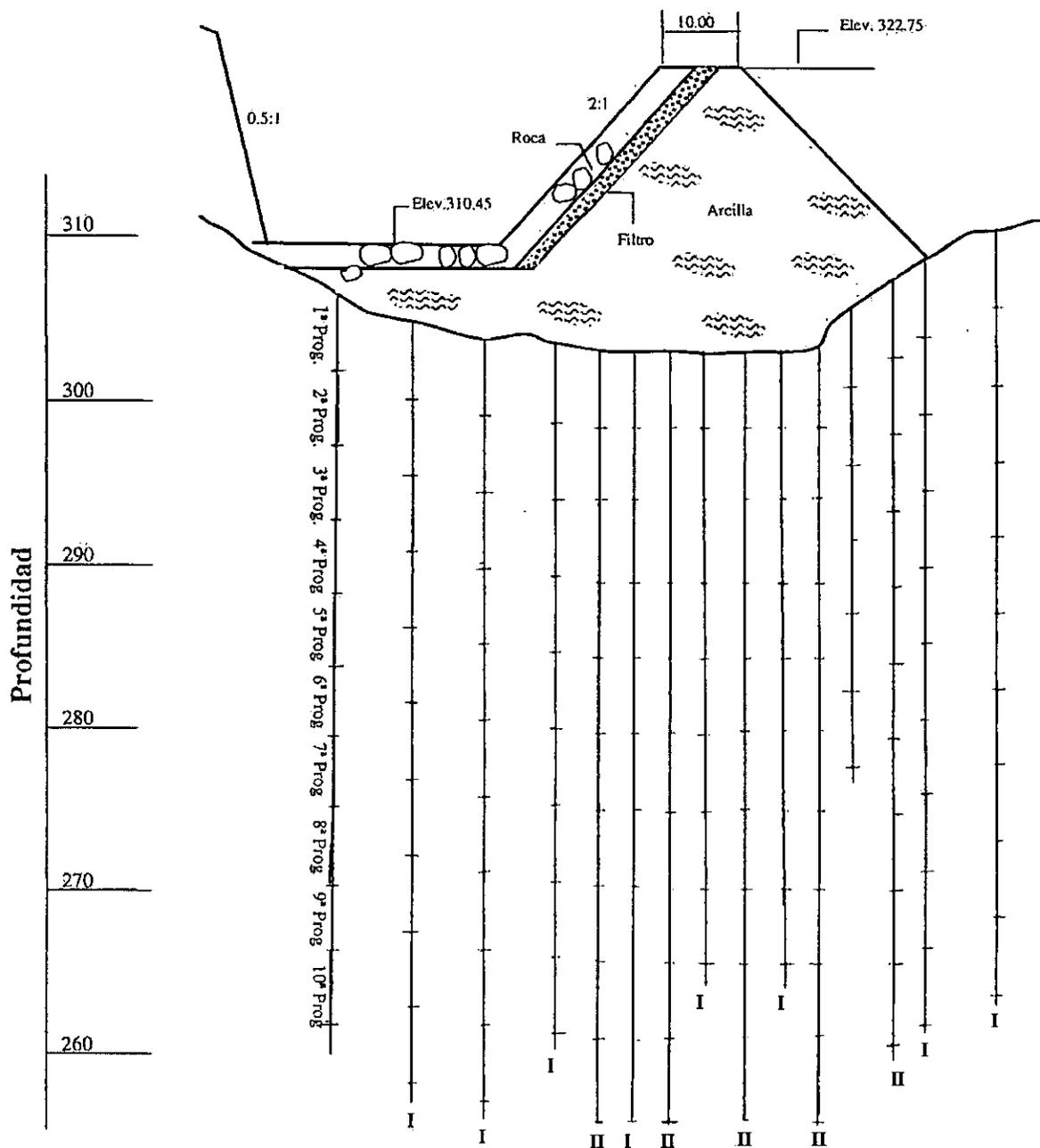


Fig. 28. Tratamientos de cimentación realizados en la presa "El Gallo"

El tratamiento se llevó a cabo mediante la perforación de barrenos en el fondo del cauce, espaciados cada 10 m en la primera etapa, en las posteriores se iban cerrando los espaciados a la mitad de la etapa anterior. Se perforaba el pozo en su totalidad a profundidades variables de 40 hasta 50 m. Luego se inyectaban por progresiones ascendentes en tramos de 5 m, quedando así que la primera progresión se ubica entre 0 y 5 m de profundidad, la segunda entre 5 y 10 m y así sucesivamente hasta llegar a la décima progresión que se encuentra a una profundidad entre los 45 y 50 m. Esto mismo se ilustra en la figura 29.



I = Barrenos de primera etapa
 II = Barrenos de segunda etapa

Fig. 29. Orden y profundidad de las progresiones realizadas en el tratamiento de cimentación.

4.3.1 Línea “F” (Línea central).

Como ya se mencionó, quedó ubicada sobre el eje de la cortina, las presiones empleadas para la inyección de lechada, quedan registradas en la tabla No. 11 y en la gráfica de la figura 26 del capítulo 3. Debido a que las absorciones de cemento fueron muy variables, para su evaluación, la pantalla se dividió en cinco tramos, que corresponden a las siguientes estaciones:

1. 0 - 025 hasta 0 + 035
2. 0 + 035 hasta 0 + 105
3. 0 + 105 hasta 0 + 220
4. 0 + 220 hasta 0 + 320
5. 0 + 320 hasta 0 + 430

Progresión	Profundidad (m)	Presión Manométrica (kg/cm ²)	
		I Etapa	II Etapa
1	0-5	3.0	4.5
2	5-10	4.0	6.0
3	10-15	5.0	7.5
4	15-20	6.0	9.0
5	20-25	7.0	10.5
6	25-30	8.0	12.0
7	30-35	9.0	13.5
8	35-40	10.0	15.0

Tabla No 11. Presiones de inyección empleadas en la pantalla profunda, línea “F”¹

En las figuras 30 a 34, se ilustran los resultados por tramos de los consumos medios de lechada en kg/m para cada progresión y por etapas.

Para el tramo entre las estaciones 0 – 025 – 0 + 035 (figura 30), se observa que en general los consumos en las progresiones de segunda etapa son mayores que los de primera etapa, alcanzando hasta 350 kg/m en la cuarta progresión.

Si se observa la gráfica de la figura 26 (Capítulo 3) donde comparamos las presiones de inyección aplicadas durante la primera etapa y la presión crítica de la roca, podemos ver que este aumento tan drástico en los consumos se debe a que las presiones empleadas en los trabajos de inyección en todo caso son mayores a la crítica y por ello se provocó el hidrofracturamiento de la misma. En promedio los consumos quedaron en los rangos de elevados a moderados para la primera, segunda y tercera etapa y de moderadamente bajos en la cuarta etapa.

Para el tramo de 0 + 035 – 0 + 105, los consumos no fueron tan elevados como en el anterior, más que en la segunda progresión de la primera etapa, en la que se alcanzaron 225 kg/m. Para la 2^a, 3^a, 4^a y 5^a progresiones, se observa que si existió una disminución en los consumos entre cada etapa logrando así un cierre en la formación. Solo en la 1^a y 6^a progresiones de la

¹ Referencia. Reporte técnico C.N.A Tratamiento de la cimentación, presa “El Gallo” 1990)

Fig. 30. Resumen Pantalla
Tramo 0-025 - 0+035

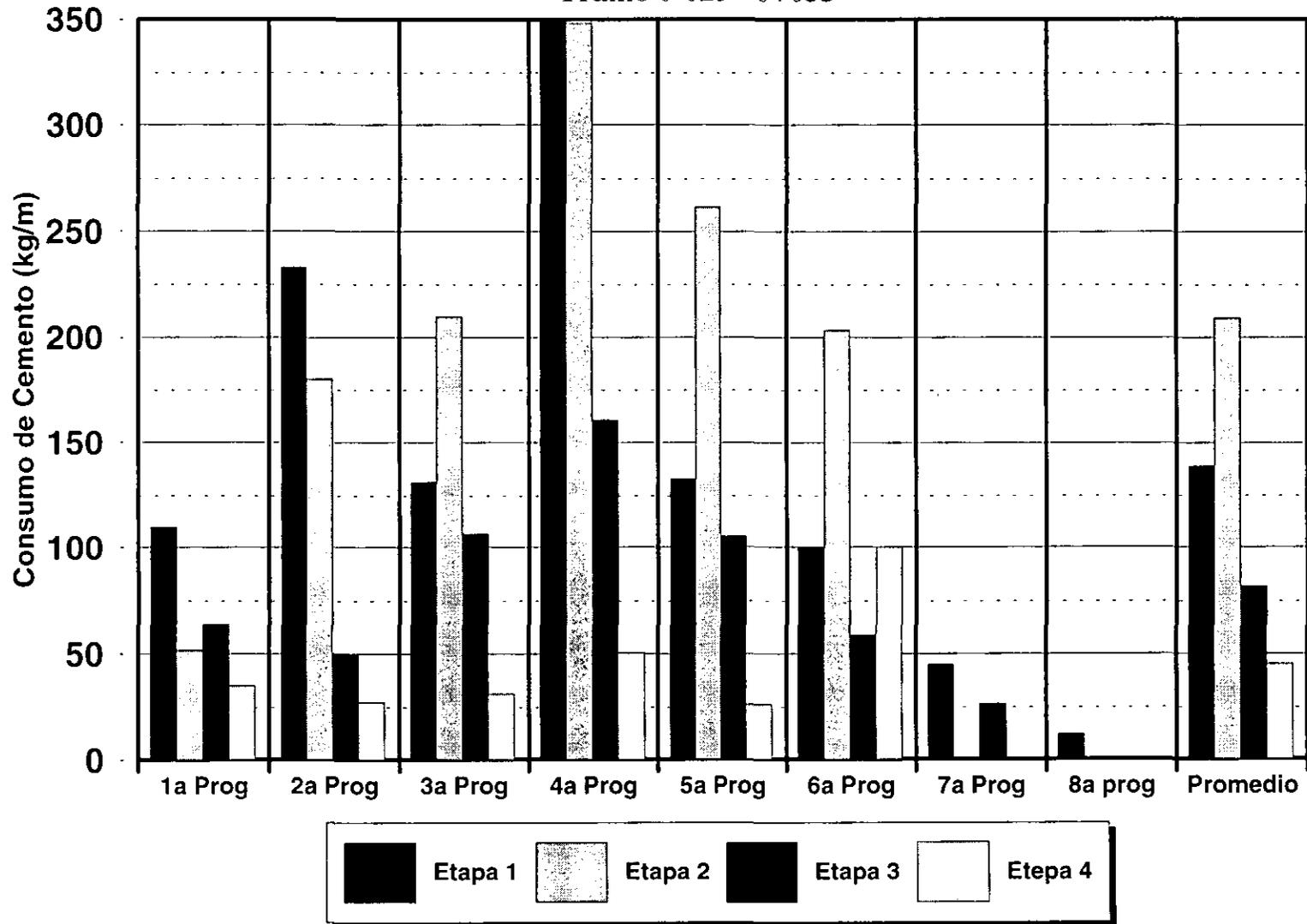


Fig. 31. Resumen Pantalla
Tramo 0+035 - 0+105

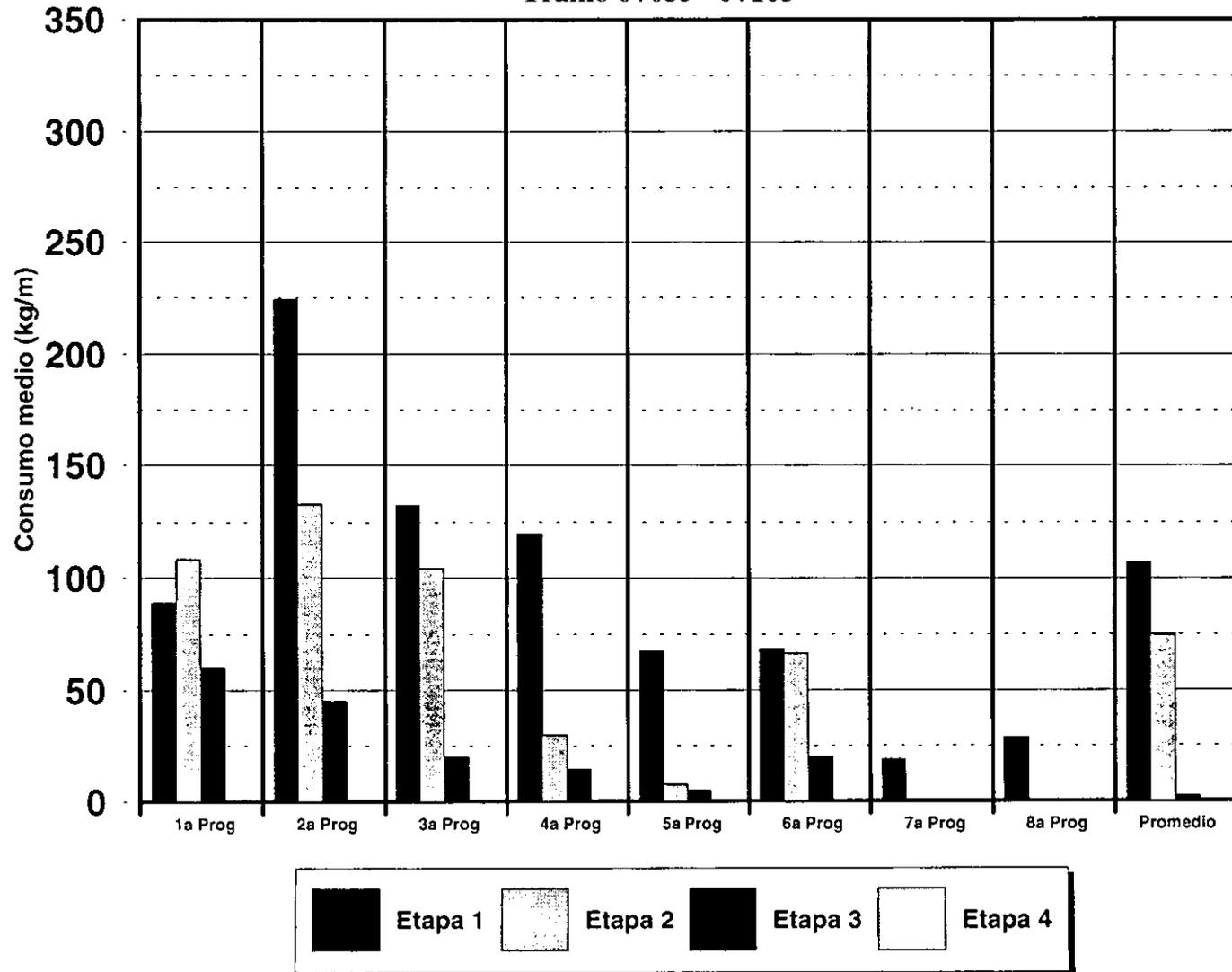


Fig. 32. Resumen Pantalla
Tramo 0+105 - 0+220

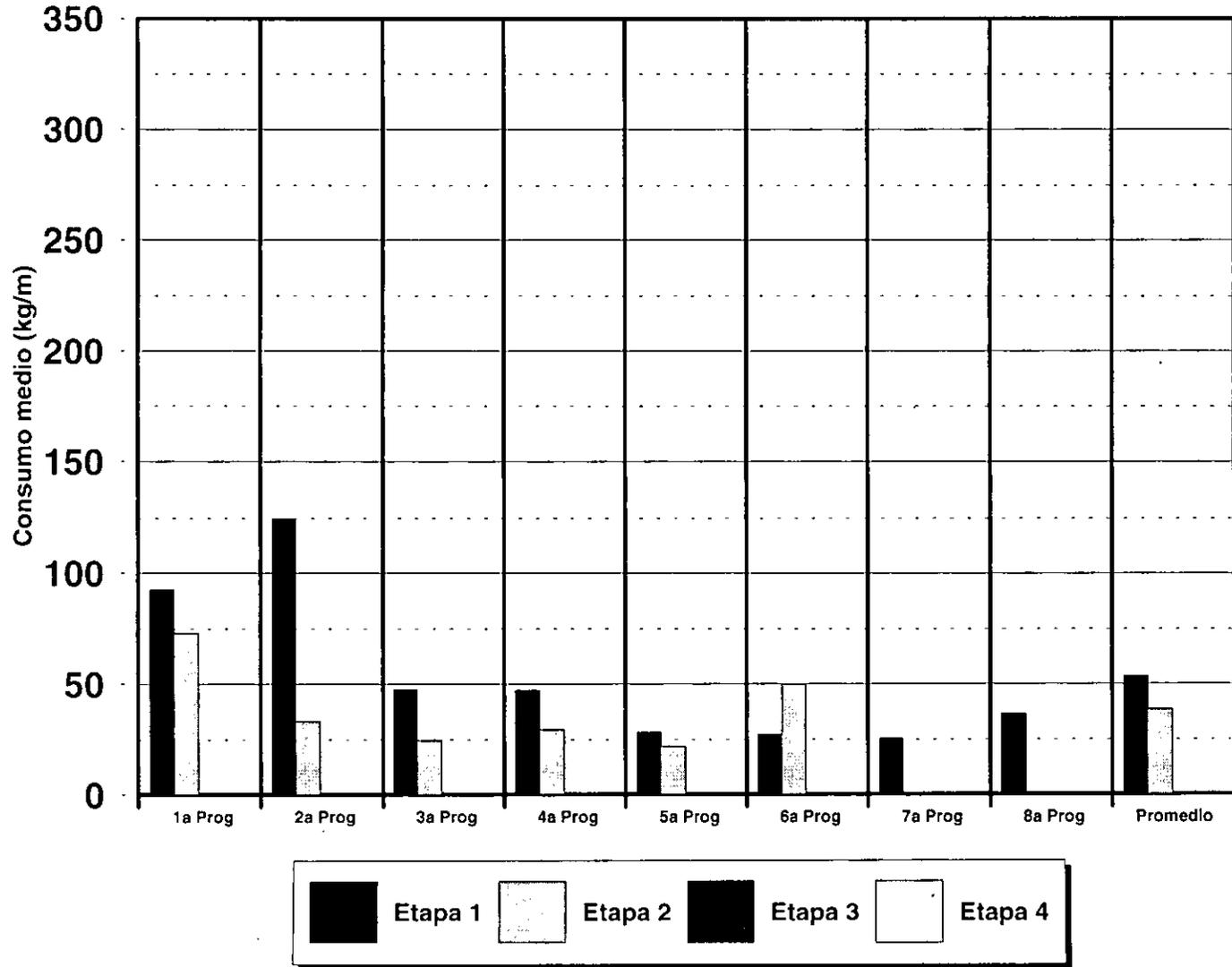


Fig. 33. Resumen Pantalla
Tramo 0+220 - 0+320

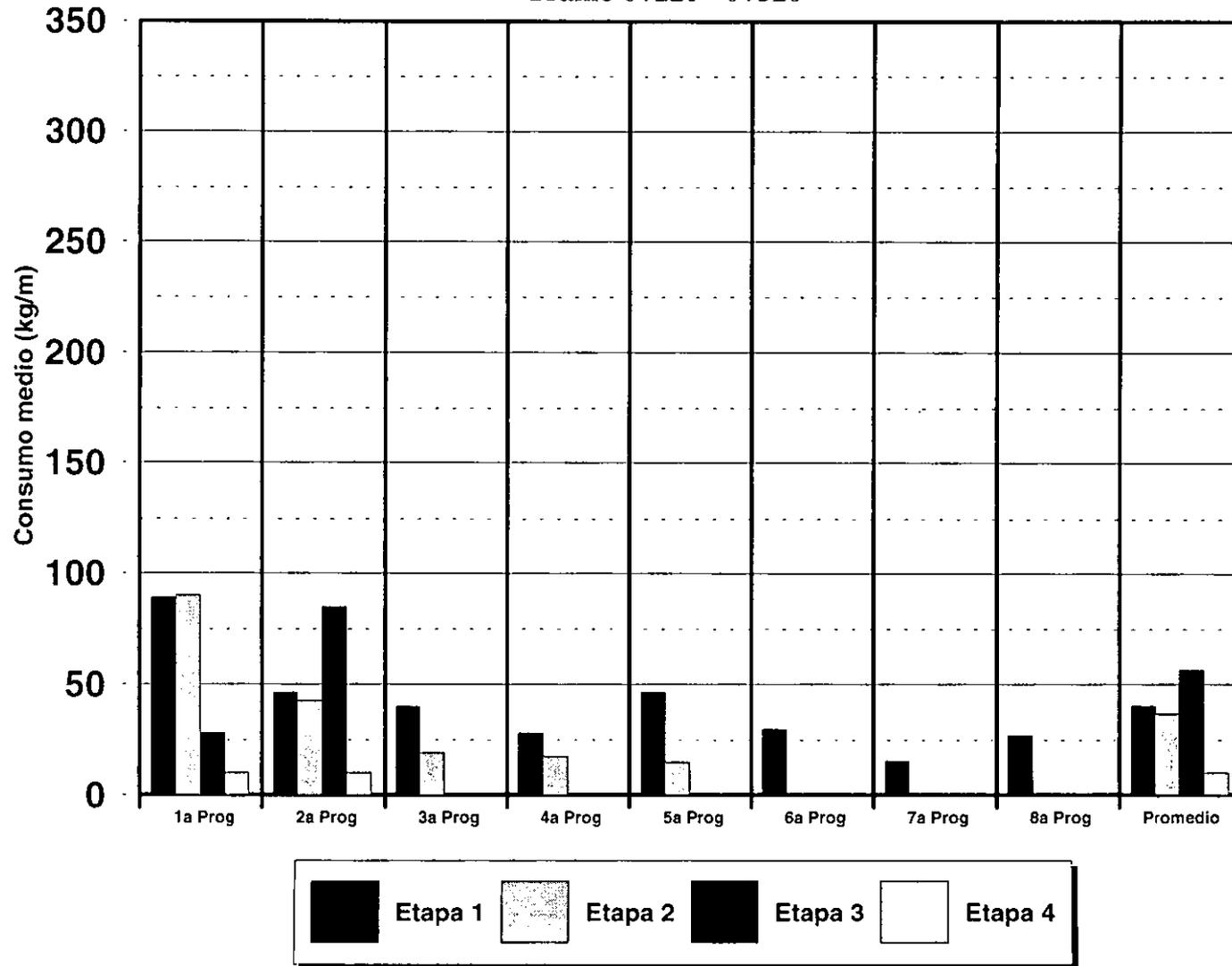
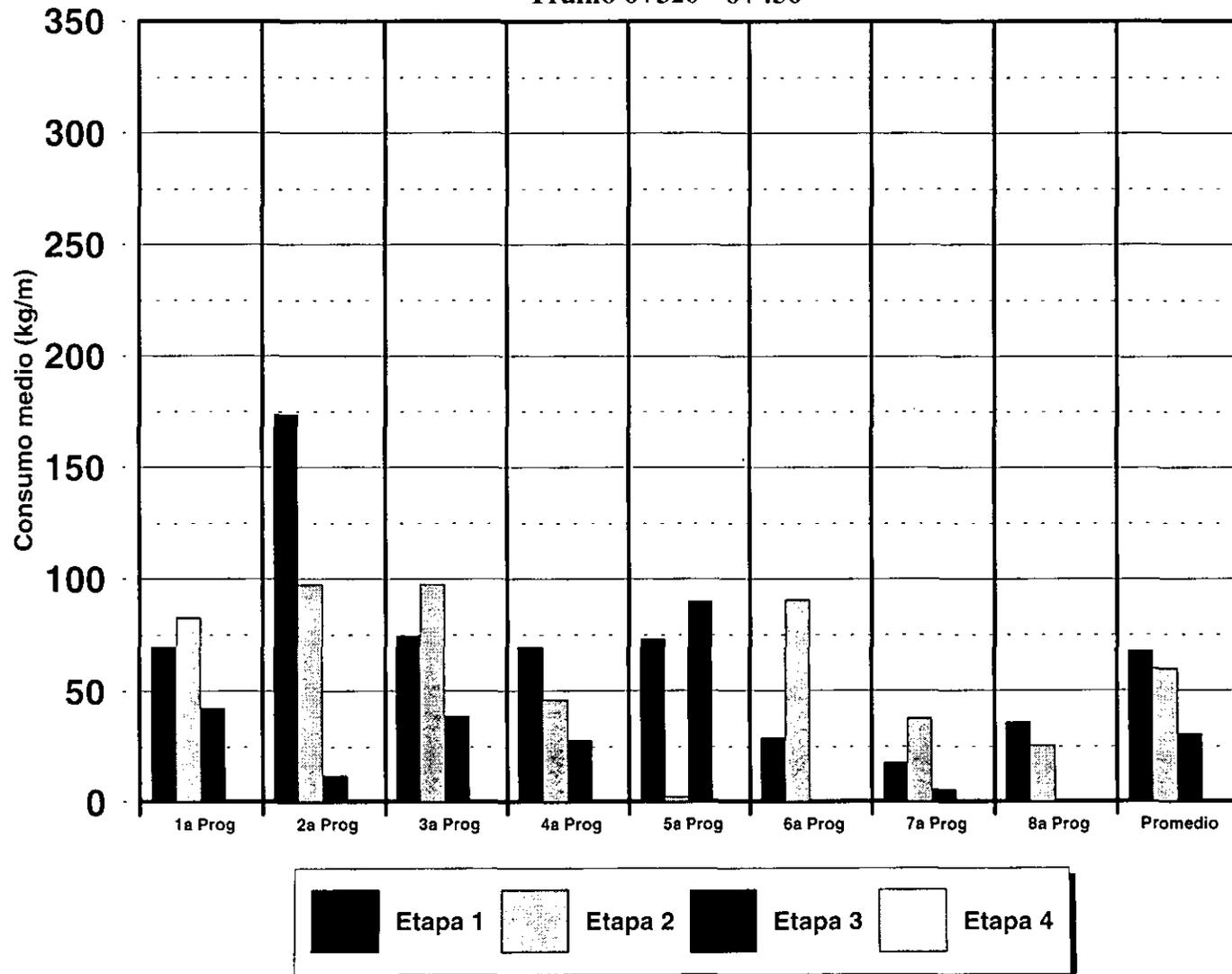


Fig. 34. Resumen Pantalla
Tramo 0+320 - 0+430



segunda etapa se hidrofracturó la roca, aunque los valores no se separaron tanto de los de 1ª etapa.

En los tramos de 0+105–0+220 y de 0+220–0+320 también se observan consumos que van de moderados a moderadamente bajos, los consumos mayores se localizan en las progresiones superiores, pero se logra una buena disminución en los consumos a profundidad.

En el resumen del tramo comprendido entre las estaciones 0+320–0+430, el consumo promedio de la primera etapa quedó en los rangos de moderado, los mayores valores se ubican en la primeras progresiones, principalmente en la segunda progresión donde se alcanzaron los 175 kg/m en la primera etapa.

En las gráficas un buen cierre en la formación quedaría marcado por la disminución en los consumos conforma el avance de las etapas. El aumento en el consumo de una etapa a la siguiente, indica la abertura o creación de nuevas fracturas en la roca (hidrofracturamiento). Este es el caso que hemos observado en la mayoría de nuestras gráficas y con ello podemos deducir en que casos ocurrió el aumento en los consumos por hidrofracturamiento.

4.3.2 Línea “E”.

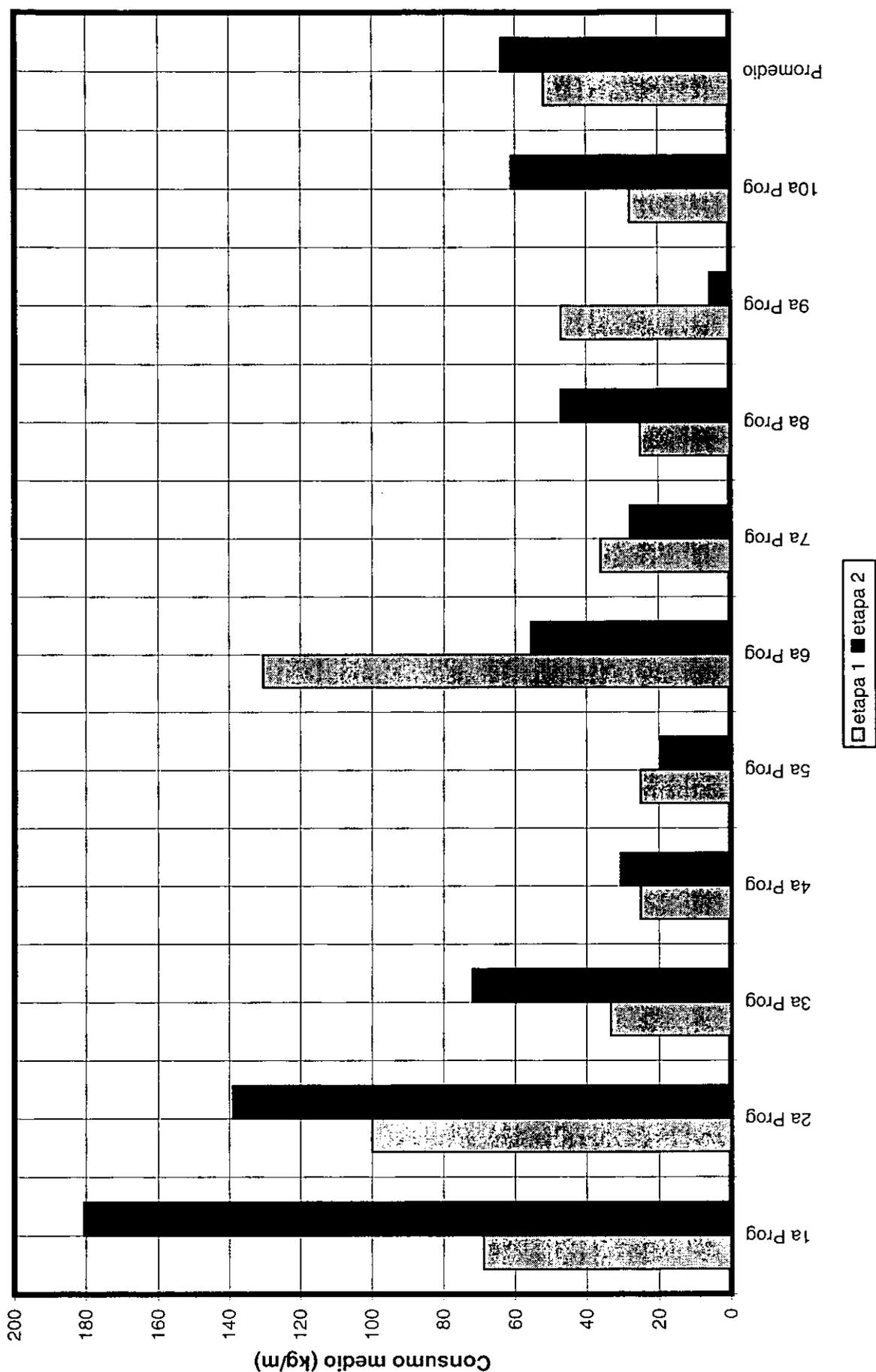
Ésta línea quedó ubicada 5 metros aguas abajo de la línea “F”, en el tramo comprendido entre las estaciones 0+125 y 0+215, en esta línea se inyectaron 10 barrenos de primera y 5 de segunda etapa, el inyectado se hizo de manera ascendente por tramos, llegando hasta diez progresiones (50 m de profundidad). Las presiones de inyección empleadas en las líneas de confinamiento de la pantalla de la cortina (líneas “E” y “G”) se registran en la tabla No. 12; la tasa promedio de consumo de cemento fue de 51.38 kg/m en los barrenos de primera etapa y de 71.8 kg/m en los de segunda etapa, calificándose en los rangos de consumo moderado. Esto mismo se representa gráficamente en la figura 35, donde se observa que hasta la cuarta progresión, en los pozos de primera etapa los consumos iban disminuyendo al aumentar las progresiones, mientras que en los de segunda etapa se tienen consumos mucho mayores a los de la anterior, al llegar a la sexta progresión de la primera fase el consumo se eleva hasta 130 kg/m, esto puede indicar que se estaba fracturando la roca al inyectar la lechada; sin embargo en las progresiones siguientes se logró una reducción en los consumos de lechada.

Progresión	Profundidad	Presión Manométrica (kg/cm ²)	
		I Etapa	II Etapa
1	0-5	1.5	2.2
2	5-10	2.0	3.0
3	10-15	3.0	4.5
4	15-20	4.0	6.0
5	20-25	5.0	7.5
6	25-30	6.0	9.0

Tabla No.12. Presiones de inyección empleadas en la pantalla profunda, líneas de confinamiento “E” y “G”¹

¹ Referencia. Reporte interno C.N.A Tratamiento de la cimentación, presa “El Gallo” 1982)

Fig. 35. Resumen Pantalla Línea E



4.3.3 Línea "G"

Se encuentra localizada cinco metros aguas arriba de la línea "F", entre las estaciones 0+110 y 0+220, en ésta línea se inyectaron 12 barrenos de primera etapa, 5 de segunda etapa y 3 de tercera etapa; el inyectado se hizo por tramos, de manera ascendente, llegando hasta ocho progresiones (40 m de profundidad) en los pozos de la primera etapa y seis progresiones (30 m de profundidad) en el resto de los pozos. La tasa promedio de consumo de cemento fue de 50.8 kg/m en los barrenos de primera etapa, de 45.1 kg/m en los de segunda etapa y de 47.6 kg/m en los de tercera, calificándose en los rangos de consumo moderado. Si examinamos la gráfica de la figura 36 encontramos que durante la primera etapa de inyección al avanzar las progresiones se iba logrando un cierre al notarse una disminución en los consumos de lechada, pero al llegar a la sexta progresión en la segunda y tercera etapa se distingue un aumento en los consumos, denotando así el hidrofracturamiento de la roca; para las siguientes progresiones al parecer ya no se inyectaron barrenos de segunda ni de tercera etapa. Los consumos promedio para esta pantalla, fueron de 50 kg/m para la primera etapa, 61.1 kg/m para la segunda y 64 kg/m para la tercera.

En el resumen del inyectado del total de la pantalla (Fig. 37) se ve que en los pozos de primera etapa el consumo más alto se presentó en la segunda progresión, con rangos moderadamente elevados, sin embargo en las progresiones siguientes disminuye a consumos bajos, el promedio total para esta etapa es de 72.2 kg/m. En la segunda etapa los consumos mostraban una tendencia a aumentar hasta la sexta progresión, solo en las progresiones 7 y 8 se logra una reducción de los consumos; la tasa promedio en esta etapa fue de 83 kg/m. Igualmente en la tercera etapa, los valores comienzan a aumentar a partir de la tercera progresión, para luego disminuir en los avances 6, 7 y 8. Finalmente en la etapa cuatro los valores son inconstantes elevándose hasta 100 kg/m en la sexta progresión, en las etapas subsiguientes ya no fue necesario inyectar barrenos de IV etapa, ya que los consumos en la etapa anterior eran moderadamente bajos, luego de ésta no aparece en las progresiones finales; el consumo promedio en esta etapa fue de 33 kg/m

En todas las etapas se observa el aumento en los consumos en algunas progresiones, como explicación se pueden dar dos interpretaciones:

- 1) Esta variaciones se deben a que seguramente se atravesó algún estrato débil de la formación Balsas o se encontró alguna discontinuidad en la roca (contacto geológico, fractura, estratificación); al inyectar la lechada en estas zonas se propicia la apertura de éstas, induciendo así el incremento en los consumos.
- 2) Estos incrementos son provocados por el empleo de presiones mayores a la crítica, como se ve en los barrenos de exploración (anexoII), las presiones máximas reportadas fluctúan entre 2 y 9 kg/cm², estos valores representan la presión máxima que soporta la roca sin llegar al fracturamiento; en la tabla No. 24 se observa que las presiones empleadas en los trabajos de inyección se elevan hasta 18 kg/cm², por lo cual es muy probable que con estos valores se haya alcanzado el hidrofracturamiento de la roca.

El término hidrofracturamiento se refiere a la creación de nuevas fracturas en la roca, o a la apertura de las fracturas ya existentes, pero que originalmente se encontraban cerradas;

Fig. 36. Resumen Pantalla Línea G

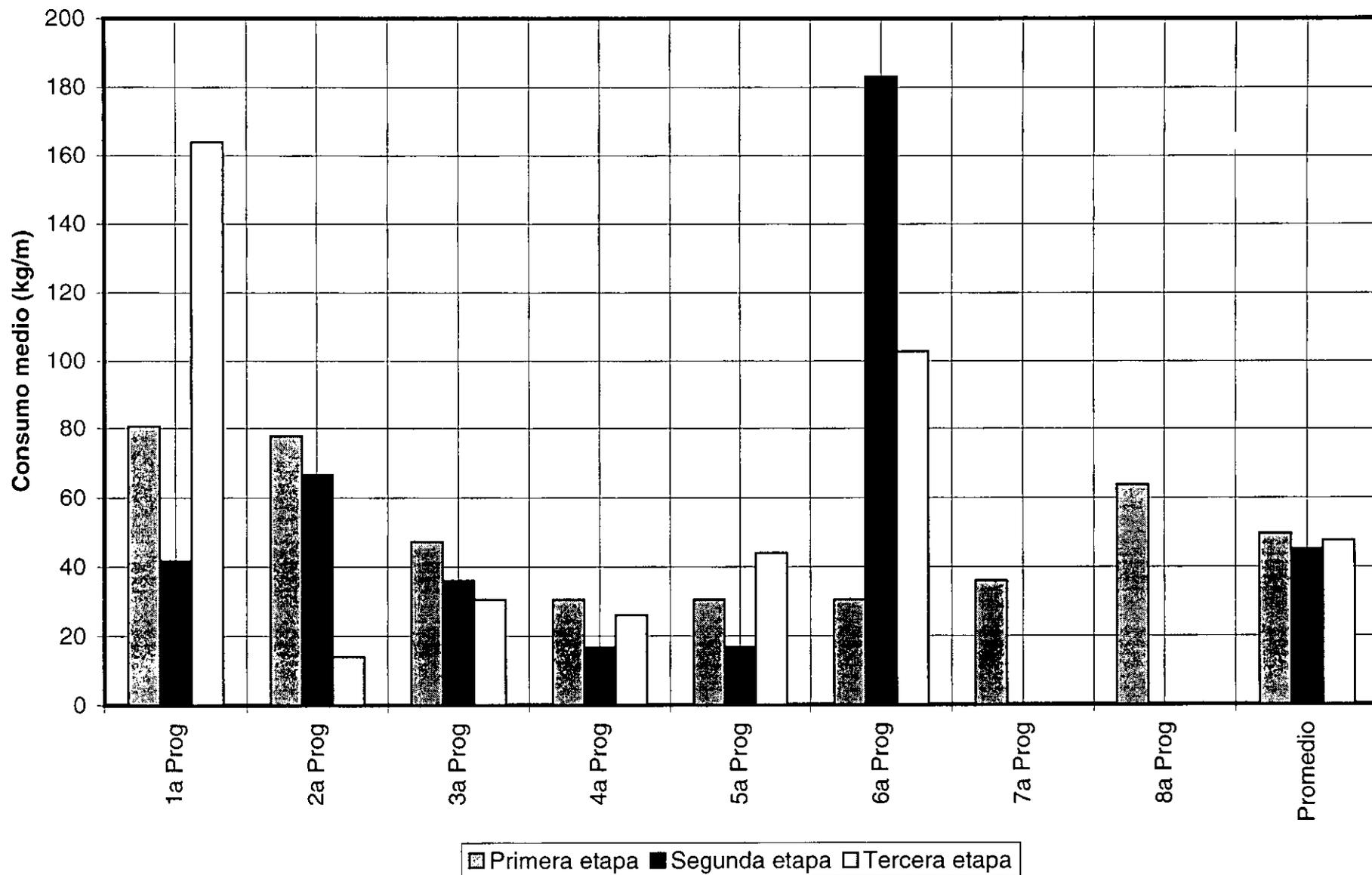
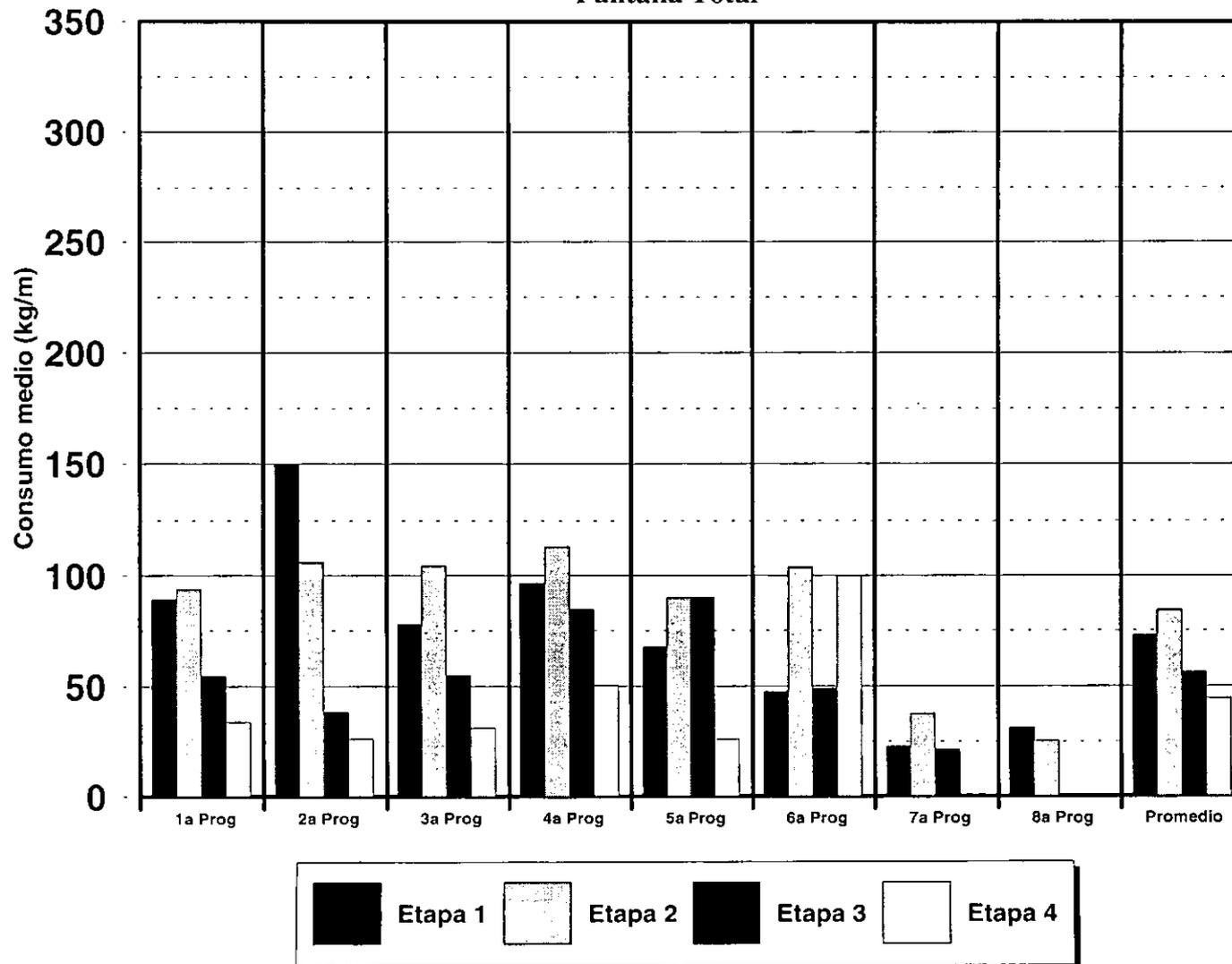


Fig. 37. Resumen Inyectado
Pantalla Total



cualquiera de éstos dos procesos provoca un aumento en el consumo de lechada y en la permeabilidad residual.

4.4 Barrenos de verificación y de investigación.

Como ya se mencionó anteriormente, fueron perforados nueve barrenos de exploración con recuperación de núcleos y pruebas de permeabilidad tipo Lugeon y Lefranc.

Según recomendaciones de la consultoría externa, estos barrenos deberían inyectarse en los mismos tramos donde se realizaron los ensayos de absorción de agua, lavándose hasta que el agua salga limpia antes de inyectarse, utilizar una sola mezcla de inyección y aplicar en dos fases.

- En la primera fase aplicar una presión de 6 kg/cm^2 y suspender la inyección durante 5 minutos.
- En la segunda fase se deberá inyectar con una presión mayor a la crítica durante 20 minutos y luego suspender.

Sin embargo, debido a que estas perforaciones ya tenían varios meses de haberse ejecutado, el carril estaba obstruido por "caídos" que impedían el paso del obturador, por lo tanto no fue posible inyectarlos por tramos; ocho barrenos se rellenaron a gravedad y uno por tramos. El barreno inyectado por tramos fue el 3 (0+172).

Los resultados de la inyección fueron: nueve tramos con consumos entre 4 y 18 kg/m y un solo tramo (63-68 m) con un consumo de 127 kg/m., a pesar de que las permeabilidades reportadas son mayores de 40 U.L. En el anexo III se encuentra el diagrama reportado para este barreno. Con esto se observa que no existe ninguna correlación entre el consumo de cemento y la absorción de agua reportada en las pruebas. Los consumos son bajos a pesar de que las presiones de inyección fueron mayores a las empleadas en las pruebas.

Según recomendaciones del Dr. F. K. Ewert se perforaron tres barrenos de investigación fuera de la zona ya tratada, uno en la estación 0+060, otro en el kilómetro 0+100 ambos con una inclinación de 60° hacia la ladera izquierda y un tercero en la estación 0+150 con la misma inclinación hacia la ladera derecha, para no perforar en arcilla,. Las perforaciones fueron de 30 m de longitud, con recuperación de núcleos y pruebas de absorción en tramos descendentes de 5 m aplicando presiones de 1-3-5-7-4-2 kg/cm^2 para los tramos iniciales entre 0 y 15 m y presiones de 2-4-6-8-10-7-4-1 kg/cm^2 para los tramos comprendidos entre los 15 y 39 m.

Posteriormente, se inyectaron en los mismos tramos de prueba, en progresiones ascendentes, con el procedimiento indicado anteriormente.

Los resultados obtenidos en las pruebas de absorción de agua, evaluando la permeabilidad en unidades Lugeon por extrapolación en los tramos donde no se llegó a la presión de 10 kg/cm^2 , se presentan en la tabla 13; además siguiendo el criterio del Dr. Ewert se evaluó la permeabilidad natural y la inducida, que es causada por la dilatación o hidrofracturamiento de la roca.

Barreno No	Tramo		Q10'	Q10*
	De	a		
0+100	3	5	25.5	35.2
	5	10	46	31.8
	10	15	41.2	38.2
	15	20	37.3	28.8
	20	25	27.8	24.7
	25	30	2.1	2.6
0+150	1	5	38.7	29.7
	5	10	7.3	9.3
	10	15	4.7	6.5
	15	20	5.8	6.8
	20	25	15.2	13.1
	25	30	20.1	17.7

Q10' = Absorción inicial en l/min/m, para 10 kg/cm² de presión. (Según F.K. Ewert)

Q10* = Absorción en l/min/m a la máxima presión, para 10 kg/cm². (Según Lugeon)

Tabla 13. Resultados de las pruebas de absorción.¹

Igualmente siguiendo las recomendaciones del Dr Ewert, se inyectaron los barrenos de investigación 0+100 y 0+150, el 0+060 no fue posible inyectarlo debido a que el pozo estaba obstruido por "caídos", por lo que únicamente se rellenó a gravedad. El procedimiento de inyección fue el siguiente:

- En la primera fase se aplicó una presión efectiva de 6 kg/cm², para inyectar solo los huecos naturales.
- Al final de la primera fase se interrumpió la inyección durante cinco minutos.
- En la segunda fase se continuó la inyección aumentando gradualmente la presión para provocar el hidrofracturamiento (Foto 11).

Los consumos obtenidos en la inyección de los barrenos 0+100 y 0+150 se presentan en las tablas 14 y 15

¹ Modificado de: Memoria descriptiva de la construcción de la presa "El Gallo". C.N.A. 1999

<i>Tramo</i>		<i>Presión</i>	<i>Consumo promedio</i>
<i>De</i>	<i>a</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>kg/m</i>
0	5	14.0	27
5	10	2.6	64*
10	15	14.0	4
15	20	14.0	14
20	25	14.0	3
25	30	14.0	0
0	30	6.0	17

* Se suspendió la inyección por resurgencia por el brocal

Tabla 14. Inyección del barreno 0+100¹

<i>Tramo</i>		<i>Presión</i>	<i>Consumo promedio</i>
<i>De</i>	<i>a</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>kg/m</i>
0	5	12.0	10
5	10	20.0	14
10	15	20.0	4
15	20	20.0	10
20	25	14.0	24
25	30	20.0	1

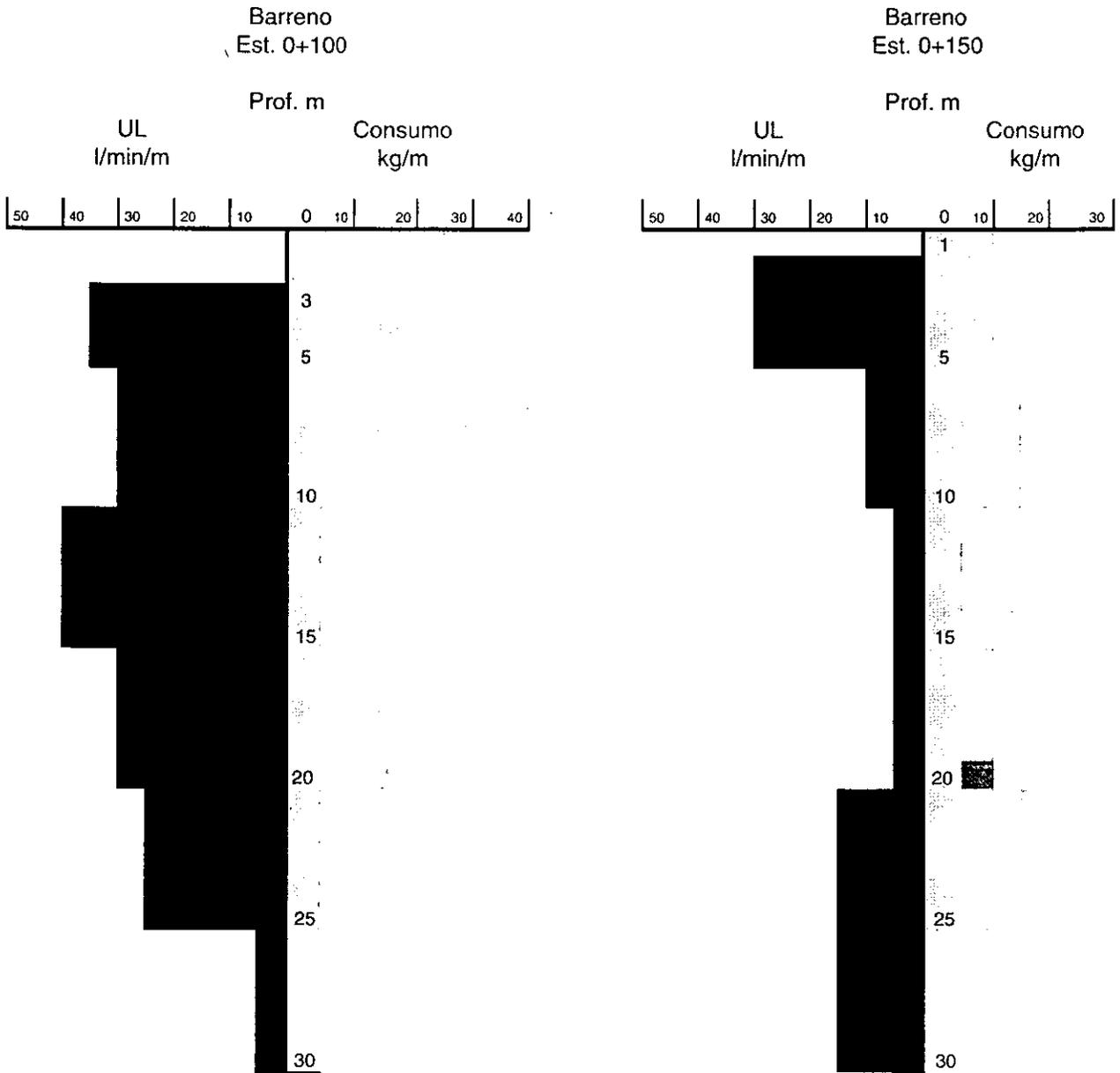
Tabla 15 . inyección del barreno 0+150.¹

¹ Referencia. Memoria descriptiva de la construcción de la presa "El Gallo". C.N.A. 1999

Como puede apreciarse los consumos fueron bajos a pesar de haberse inyectado hasta con presiones de 20 kg/cm^2 ; sin embargo, las pruebas de permeabilidad dieron como resultado que más del 60 % están dentro del rango de permeables a muy permeables, no existiendo ninguna correlación entre la absorción con agua y el consumo de cemento, demostrando que la permeabilidad existente corresponde a fisuras demasiado cerradas que no son inyectables con la técnica utilizada. Figura 38.

Fig. 38. Barrenos de Exploración

Propuestos por el Prof. Dr. F.K. Ewert



CAPÍTULO 5 **PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN.**

El objetivo general de la instrumentación, es la de comprobar si la presa se comporta dentro de los límites de diseño y de seguridad apropiados.

El tipo de instrumentos a utilizar depende de la variable a medir, las magnitudes de los parámetros que se medirán, de las condiciones del medio en que será utilizado y de la vida útil esperada, mientras que su ubicación depende de la geometría de la presa, las condiciones topográficas y geológicas, del proceso constructivo y de los resultados de los análisis numéricos.

Los piezómetros sirven para medir la presión hidrostática o carga del agua que llena los vacíos entre las partículas minerales sólidas del suelo; ayudan a conocer los cambios en el nivel del agua dentro del terraplén y cerca del núcleo, los que pudieran indicar anomalías o deficiencias en la barrera impermeable; además los piezómetros colocados en la roca cerca del desplante permiten discriminar la trayectoria seguida por el agua, identificando así si es por el núcleo o por la roca de cimentación que se están dando las filtraciones.

Los extensómetros ayudan a estimar las deformaciones del material y comparar los valores obtenidos de ésta manera con los obtenidos en los análisis numéricos, de manera que se pueda prever oportunamente la posible ocurrencia de deformaciones inconvenientes.

Los inclinómetros auxilian en la determinación de los desplazamientos horizontales y verticales en el interior del terraplén. En superficie estos desplazamientos se registran con la medición de referencias topográficas y de una red de triangulación de precisión.

Los aforadores sirven para medir el gasto de las filtraciones que pudieran presentarse en las laderas o en los taludes.

Finalmente los acelerógrafos digitales se utilizan para medir las magnitudes de las aceleraciones provocadas en la estructura por sismos fuertes.

Al igual que toda la construcción de la presa, la instrumentación se realizó en dos etapas. A continuación se describirán los proyectos de instrumentación implementados en cada una de ellas

5.1 Primera Etapa.

El proyecto de instrumentación inicial lo realizó la CNA en 1985; éste contempló la instalación de instrumentos en tres secciones transversales de la cortina localizadas en los cadenamientos 0+090, 0+130 y 0+258 m (tabla 16), lo que permitía una distribución adecuada para conocer el comportamiento de la presa en dos secciones transversales máximas y una cercana al empotramiento izquierdo de roca de mala calidad. De éstos se instalaron los aparatos

correspondientes a la sección 0+258 m, dado que esta sección quedó dentro del terraplén de la primera etapa de construcción. Los aparatos colocados fueron:

Dos inclinómetros (I - 5 e I - 6), los cuales a pesar de algunas deficiencias en su colocación, en la revisión realizada en 1997 por la CFE, se mostraban en buen estado; en el proyecto de instrumentación definitivo estos inclinómetros fueron renombrados como I-3 e I-4, respectivamente; también fueron instalados dos piezómetros abiertos (EPCG -3-1 y EPCG -3-2), los cuales funcionan adecuadamente

<i>Instrumento</i>	<i>Sección 0+090</i>	<i>Sección 0+130</i>	<i>Sección 0+258</i>	<i>Ladera M. I.</i>	<i>Ladera M. D.</i>	<i>Corona</i>	<i>Total</i>
Inclinómetro	2	2	2				6
Piezómetro abierto	2	2	2				6
Piezómetro neumático	3	3	3				9
Grupo de 6 celdas de presión y 6 extensómetros		1					1
Acelerógrafo		1		1	1	1	4
Referencias superficiales	5	11	10			20	46
Bancos de nivel				1	1		2
Referencias fijas				1	1		2
Bases de centraje				1	1		2
Testigos de cimentación							2
Testigos hidráulicos		2					2

Tabla No. 16. Proyecto de la instrumentación original.

5.2 Segunda Etapa.

Con base en la información recabada sobre la geología, topografía, tipo de presa, materiales utilizados para construir la estructura y de una visita de inspección al sitio, la CFE elaboró un nuevo proyecto de instrumentación

En éste se tomó en cuenta que los principales factores que influyen en el comportamiento de la cortina y sus apoyos son: las condiciones de la roca de cimentación, la calidad de los materiales empleados en la construcción y la ocurrencia de sismos fuertes, se tomó la decisión de medir los siguientes parámetros:

- Conocer los niveles de agua tanto en la roca de cimentación como en el terraplén, aguas abajo de la pantalla impermeable.
- Vigilar la posible ocurrencia de fracturas transversales en el núcleo, particularmente en la junta entre la parte construida durante la primera etapa y la nueva realizada en la segunda .

- Conocer los desplazamientos horizontales y verticales en puntos característicos de la estructura, tanto en superficie como en el interior.
- Determinar la magnitud de las aceleraciones impuestas por sismos fuertes.

Con el propósito de alcanzar estos objetivos, la instrumentación propuesta originalmente por la CNA se modificó substancialmente. Los cambios más importantes consistieron básicamente en reubicar los instrumentos; utilizar piezómetros y celdas con transductor eléctrico de cuerdo con un arreglo adecuado, para evaluar la interacción de materiales; se incrementó significativamente el número de piezómetros en las laderas y se propuso instalar un inclinómetro adicional en la junta entre el terraplén construido en la primera etapa y el construido en la segunda, así como extensómetros para evaluar el comportamiento de la junta constructiva. Con esta instrumentación se pretendía conocer el comportamiento de la estructura y evaluar su seguridad a corto y largo plazo.

En la tabla No. 17 se relacionan todos los instrumentos que fueron instalados en el proyecto de instrumentación definitivo, En Anexo I se encuentran los planos en que se muestra la ubicación de los instrumentos, en planta (Plano 10) y en secciones (Plano 11).

RELACION DE INSTRUMENTOS INSTALADOS			
INSTRUMENTO	NOMENCLATURA	UBICACIÓN	NOTAS
INCLINÓMETRO			
INCLINÓMETRO	I-1	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+130	
INCLINÓMETRO	I-2	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+130	
INCLINÓMETRO	I-3	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+258	Instalado por CNA en la primera etapa constructiva
INCLINÓMETRO	I-4	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+258	Instalado por CNA en la primera etapa constructiva
INCLINÓMETRO	I-5	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+208	
PIEZÓMETRO ABIERTO EN CORTINA			
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-1-1	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+060	
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-1-2	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+060	
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-2-1	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+130	
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-2-2	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+130	
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-3-1	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+258	Instalado por CNA en la primera etapa constructiva
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-3-2	FILTRO AGUAS ABAJO E=0+258	Instalado por CNA en la primera etapa constructiva
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-4-1	ATAGUÍA AGUAS ABAJO E=0+200	
PIEZÓMETRO ABIERTO	EPCG-4-2	ATAGUÍA AGUAS ABAJO E=0+200	
PIEZÓMETRO ABIERTO EN LADERAS			
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-1-1	LADERA MARGEN DERECHA E=0+448	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-1-2	LADERA MARGEN DERECHA E=0+448	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-2-1	LADERA MARGEN DERECHA E=0+394	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-2-2	LADERA MARGEN DERECHA E=0+394	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-3-1	LADERA MARGEN DERECHA E=0+363	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAD-3-2	LADERA MARGEN DERECHA E=0+363	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-1-1	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0-007	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-1-2	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0-007	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-2-1	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0+060	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-2-2	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0+060	

Tabla No. 17. Relación de instrumentos instalados en la presa "El Gallo", Gro.

RELACION DE INSTRUMENTOS INSTALADOS

INSTRUMENTO	NOMENCLATURA	UBICACIÓN	NOTAS
PIEZÓMETRO ABIERTO EN LADERAS			
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-3-1	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0+087	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-3-2	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0+087	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-4-1	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0-150	
PIEZÓMETRO ABIERTO	PZAI-4-2	LADERA MARGEN IZQUIERDA E=0-150	
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO			
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	EPEC-1	ROCA DE CIMENTACIÓN E=0+130	
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	EPEC-2	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+130	
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	EPEC-3	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+130	
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	EPEC-4	NÚCLEO DE ARCILLA E=0+205	
PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	EPEC-5	CONTACTO ROCA-ARCILLA ETAPAS I Y II E=0+152	
EXTENSÓMETROS Elev.337			
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-1	NÚCLEO DE ARCILLA 0+203.816	Ver detalles en ficha de instalación
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-3	NÚCLEO DE ARCILLA 0+208.314	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-4	NÚCLEO DE ARCILLA 0+209.802	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-5	NÚCLEO DE ARCILLA 0+212.807	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-7	NÚCLEO DE ARCILLA 0+212.807	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-337-8	NÚCLEO DE ARCILLA 0+212.807	"
EXTENSÓMETROS Elev.365			
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-1	CENTRO DEL NÚCLEO 0+247.830	Ver detalles en ficha de instalación
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-2	CENTRO DEL NÚCLEO 0+250.772	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-3	CENTRO DEL NÚCLEO 0+253.721	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-4	CENTRO DEL NÚCLEO 0+256.687	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-5	CENTRO DEL NÚCLEO 0+259.636	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-6	CENTRO DEL NÚCLEO 0+262.606	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-7	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-8	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-9	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-10	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-11	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-12	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-13	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
EXTENSÓMETRO CON DOBLE SENSOR	EXT-365-14	CENTRO DEL NÚCLEO 0+265.561	"
BANCO DE NIVEL			
BANCO DE NIVEL	BN-1		Destruído durante actividades constructivas en la zona
BANCO DE NIVEL	BN-1A	LADERA MARGEN DERECHA	Definitivo
BANCO DE NIVEL	BN-2	LADERA MARGEN IZQUIERDA	

Continuación Tabla No. 17.

RELACION DE INSTRUMENTOS INSTALADOS			
INSTRUMENTO	NOMENCLATURA	UBICACIÓN	NOTAS
BANCO DE NIVEL			
BANCO DE NIVEL	BN-3	ATAGUÍA AGUAS ABAJO MARGEN DERECHA	
BANCO DE NIVEL	BN-4	ATAGUÍA AGUAS ABAJO MARGEN IZQUIERDA	
MIRAS FIJAS			
PARALELA I-1	MF-1	MARGEN DERECHA	
PARALELA I-2	MF-2	MARGEN DERECHA	
EJE CORTINA	MF-3	MARGEN DERECHA	Mira pintada en care de base de centraje de CNA, sobre M.D.
INTERSECCIÓN I-2	MF-12	MARGEN DERECHA	
INTERSECCIÓN I-3	MF-13	MARGEN DERECHA	
INTERSECCIÓN I-4	MF-14	MARGEN DERECHA	
INTERSECCIÓN I-5	MF-15 (0+205)	MARGEN DERECHA	Habilitada durante etapa constructiva
INTERSECCIÓN I-5	MF-15 (0+208)	MARGEN DERECHA	Mira fija definitiva
BASES DE CENTRAJE PARA RED DE TRIANGULACIÓN			
BASE DE CENTRAJE	M1	MARGEN IZQUIERDA	
BASE DE CENTRAJE	M2	MARGEN DERECHA	
BASE DE CENTRAJE	M3	MARGEN IZQUIERDA	
BASE DE CENTRAJE	M4	MARGEN DERECHA	
BASE DE CENTRAJE	M5	MARGEN IZQUIERDA	
BASE DE CENTRAJE	M6	MARGEN DERECHA	
BASE DE CENTRAJE	M6'	MARGEN DERECHA	
REFERENCIAS SUPERFICIALES			
REFERENCIAS TRASVERSALES	MI-0 a MI-13	E=0+130	
	MD-0 a MD-13	E=0+258	
REFERENCIAS LONGITUDINALES	RL-1 a RL-23	HOMBRO AGUAS ARRIBA	
ACELERÓGRAFOS			
ACELERÓGRAFO	GABC	ATAGUÍA AGUAS ABAJO E=0+208	
ACELERÓGRAFO	GACI	CORONA E=0+130	
ACELERÓGRAFO	GACD	CORONA E=0+320	
ACELERÓGRAFO	GAMD	MARGEN DERECHA E=0+418	

Continuación Tabla No. 17.

RELACION DE INSTRUMENTOS INSTALADOS			
INSTRUMENTO	NOMENCLATURA	UBICACIÓN	NOTAS
CASETA PARA ACELERÓGRAFO			
CASETA BASE CORTINA	_____	ATAGUÍA AGUAS ABAJO E=0+208	
CASETA CORONA M.I.	_____	CORONA E=0+130	
CASETA CORONA M.D.	_____	CORONA E=0+320	
CASETA MARGEN DERECHA	_____	MARGEN DERECHA E=0+418	

Continuación Tabla No. 17.

5.3 Resultados de las mediciones.

Durante la etapa crítica del primer llenado se llevó a cabo una cuidadosa vigilancia en la instrumentación; éste comenzó el 5 de junio de 1998, con el cierre del túnel de desvío, y concluyó cuando el vertedor de cresta libre comenzó a derramar el 27 de agosto del mismo año. A continuación se presenta un resumen del comportamiento de la estructura a partir de esta fecha y hasta enero del 2000.

En la figura 39 se presenta la sección transversal correspondiente al cadenamiento 0+130, con la localización de sus piezómetros e inclinómetros; esta sección corresponde al cuerpo de la cortina de la última etapa de construcción. En ella se presentan las lecturas registradas en el mes de agosto de 1998, para los piezómetros EPEC-1, EPCG-2-1 y EPCG-2-2, con lo cual se dibujó la distribución piezométrica en la cortina, que a su vez da una idea de la subpresión existente bajo el cuerpo de ésta.

Teóricamente, la presencia de una pantalla impermeable perfecta logra una rápida caída de presión a partir de la correspondiente al nivel del embalse y la subpresión tras la pantalla corresponde al nivel de aguas abajo de la presa. Esto se ilustra en forma esquemática en la Figura 40 a. En cambio el efecto de una pantalla razonablemente buena, pero ya no teóricamente perfecta, permite una caída de presión, aunque en menor grado que en el caso anterior, sin embargo continúa una subpresión considerable aguas abajo de la pantalla, figura 40 b.

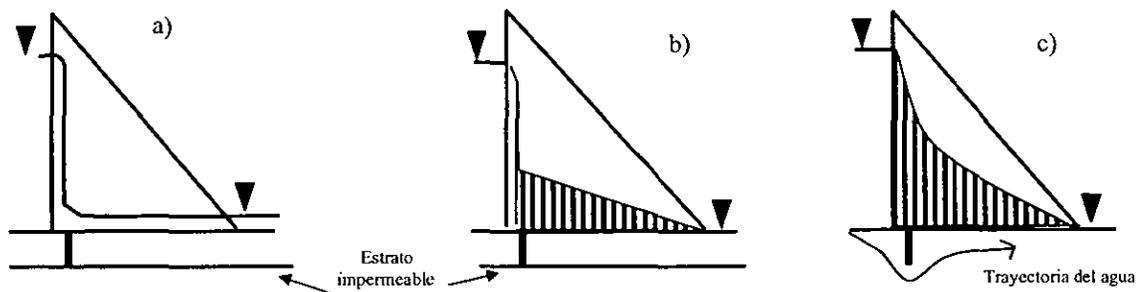


Fig. 40. Diagramas hipotéticos de subpresión bajo una cortina de concreto.

En el caso de la figura 40 c, se presenta una pantalla que no está ligada a un estrato impermeable (pantalla colgante), en el cual se provoca una caída menos brusca de la presión, ya que solo permite alargar la trayectoria de recorrido del agua y disminuir los valores de subpresión en la cimentación, en el caso de que la pantalla sea efectiva.

Como podemos observar este es el caso que más se ajusta a lo que ocurre en la presa "El Gallo", en la cual existe una caída gradual de carga provocando subpresiones importantes en el núcleo de la cortina y en el respaldo aguas abajo, por lo que se concluye que la pantalla ha sido poco efectiva.

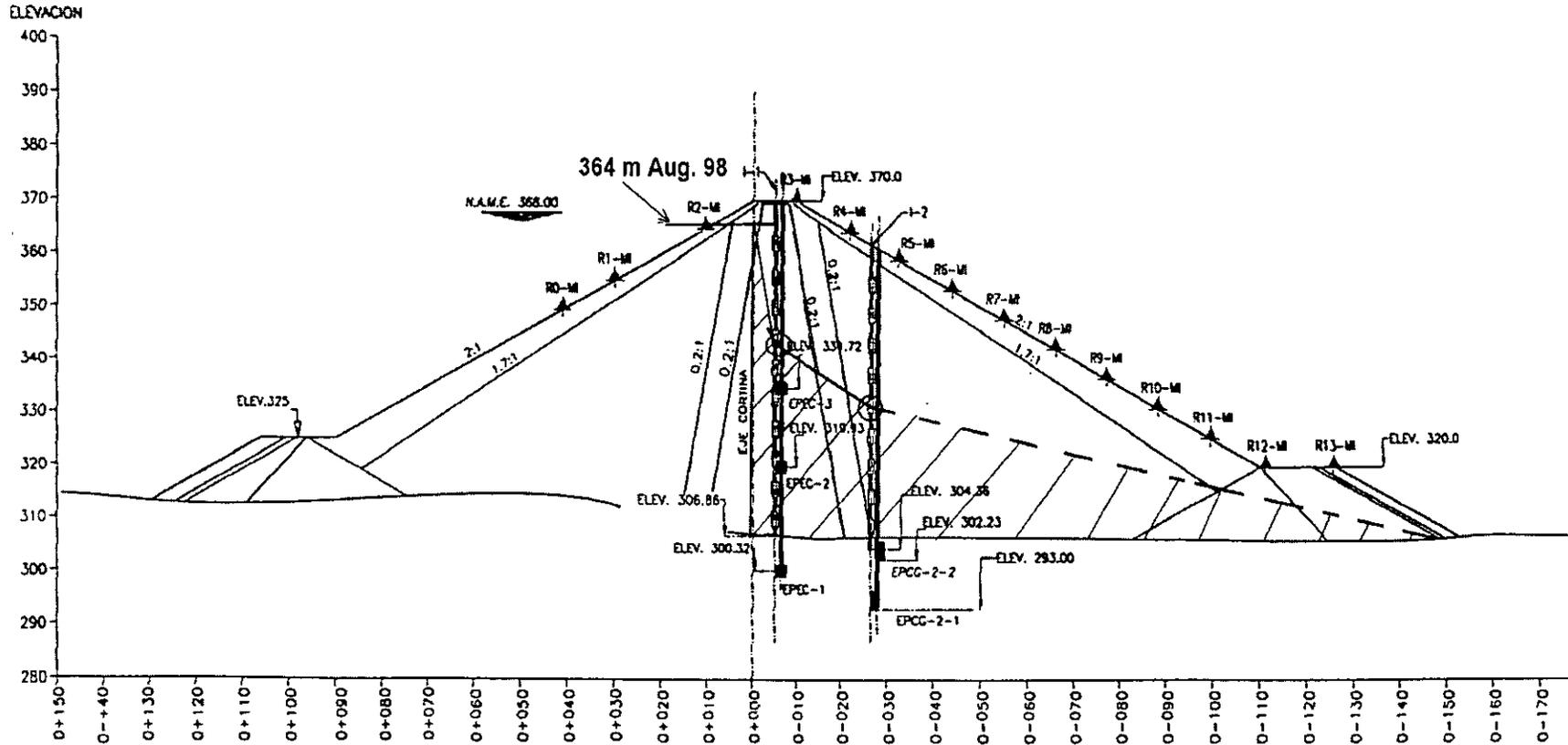


Fig. 39. Sección transversal de la cortina en la estación 0+130 con piezómetros y distribución de la subpresión

En la gráfica de la figura 41, se indican las mediciones obtenidas de los piezómetros de la estación 0+130, junto con la elevación del embalse. Las observaciones abarcan desde la fecha de inicio del primer llenado hasta enero del 2000. En la gráfica de elevación vs tiempo se observa un comportamiento normal, ya que las curvas de los piezómetros corren aparentemente paralelas al nivel del embalse, el valor máximo se registró en el piezómetro EPEC-1 con una elevación de 342.07 m.

En la siguiente gráfica en que se presenta la elevación del embalse de la presa vs la elevación piezométrica, la correspondencia que se observa es lineal, aunque los niveles piezométricos han bajado más rápidamente que el nivel del embalse, lo cual indica un efecto de impermeabilización entre el embalse y el agua que fluye debajo de la presa. En vista de que el río Cutzamala tiene una gran carga de sedimentos finos proveniente de su cuenca alta, debido a la erosión de los suelos deforestados, existe un efecto de autosellado, esto es, que en el lado de aguas arriba se debe estar formando un delantal con los sedimentos finos de baja permeabilidad.

Finalmente en la figura 42 se presentan los gastos de filtraciones medidos desde agosto de 1998 hasta marzo del 2000. Se nota que los caudales de filtración siguen las variaciones del embalse, los mayores gastos se registraron en septiembre del 98 alcanzando 180 l/s, hasta julio del 99 se observa una disminución en las filtraciones llegando hasta 120 l/s, posteriormente se da un aumento en el nivel del embalse, lo cual se refleja en un aumento en las filtraciones alcanzando un máximo de 160 l/s, A partir de esta fecha se observa una tendencia a disminuir. La correlación entre las filtraciones y en nivel del embalse (figura 42 b) se muestra lineal durante el llenado inicial, pero luego se observa un decremento y un nuevo aumento en la curva. Estos cambios delatan un aparente aumento en la cantidad de filtraciones registradas en el año 2000. Es probable que estas variaciones en el gasto de las filtraciones, sean solo aparentes, ya que el aforador se encuentra azolvado y por ello no trabaja en forma precisa.

En este trabajo se ha enfocado la atención hacia los piezómetros. En la tabla No. 18 se indican los valores máximos registrados en toda la instrumentación, en el periodo de junio de 1998 a enero del 2000.

<i>Variable</i>	<i>Instrumento</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Periodo</i>
Asentamientos	Inclinómetros	9.9 cm (I-5)	Sep/98 a Nov/99
	Referencias superficiales	72.7 cm	Nov/98 a Nov/99
Desplazamientos	Inclinómetros	3.20 mm (I-1)	Sep/98 a Nov/99
	Referencias superficiales	18.4 mm	Nov/98 a Nov/99
Deformaciones unitarias	Extensómetros eléctricos	0.25 % (tensión) 0.12 % (compresión)	Jun/98 a enero/2000
Niveles de agua y piezométricos	Inclinómetros	344.5 m (I-3)	Jun/98 a enero/2000
	Piezómetros abiertos	358.42 m (PZAD-1-2)	
	Piezómetros eléctricos	342.22 m (EPEC-5)	
Filtraciones	Dispositivos de aforo	209.66 l/s (Tubo dren)	Jun/98 a enero/2000
Registros sísmicos	Acelerógrafos	78 cm/s ² (GL 13)	1999

Tabla No. 18. Valores máximos totales registrados.

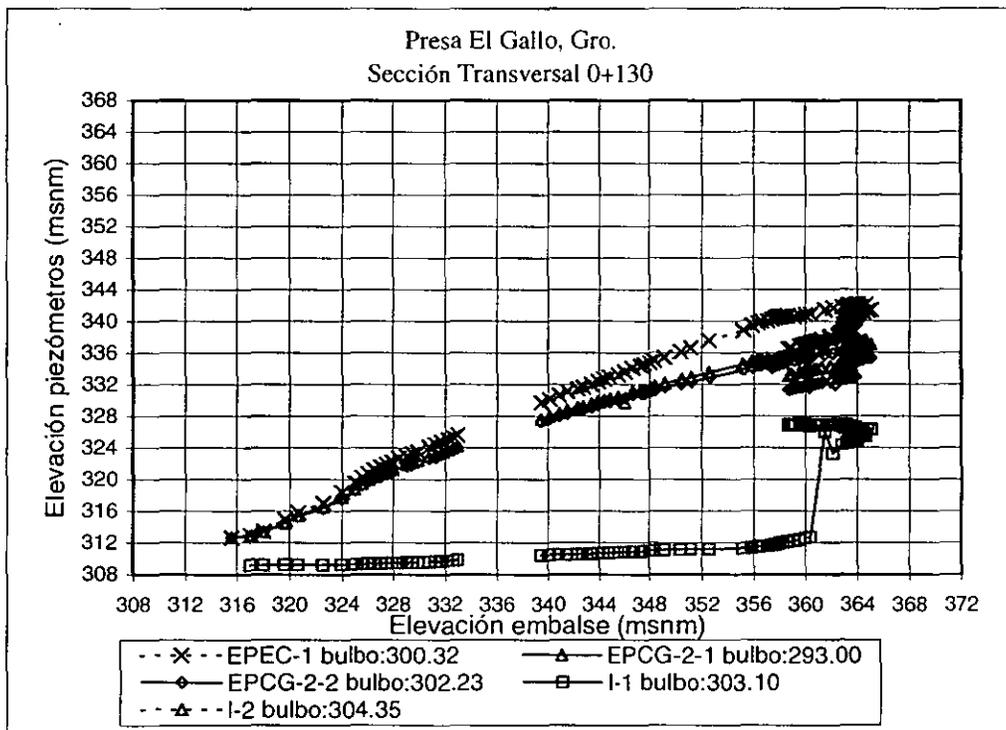
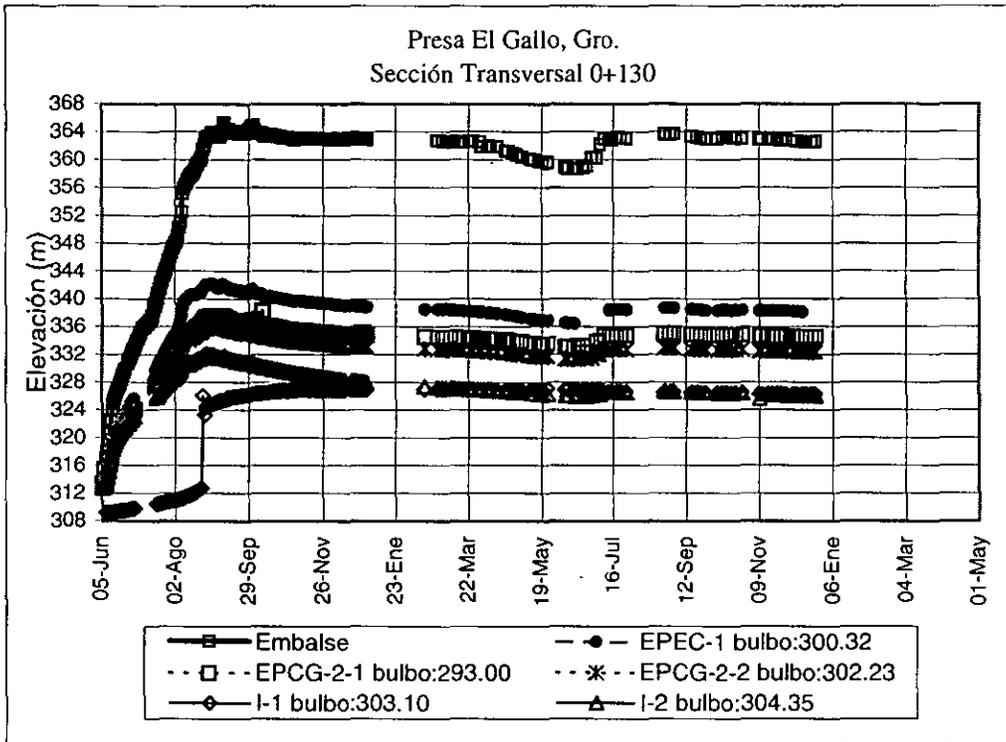


Fig. 41. Evolución de los piezómetros en la estación 0+130 (Piezometría y elevación de embalse con el tiempo y piezometría contra el nivel del embalse)

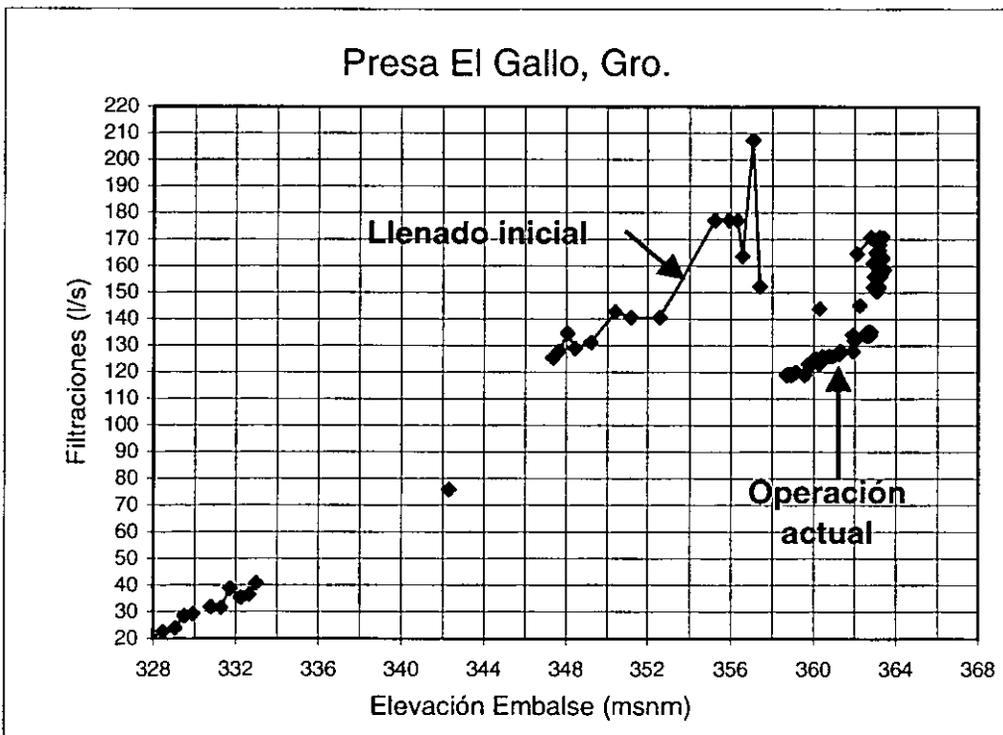
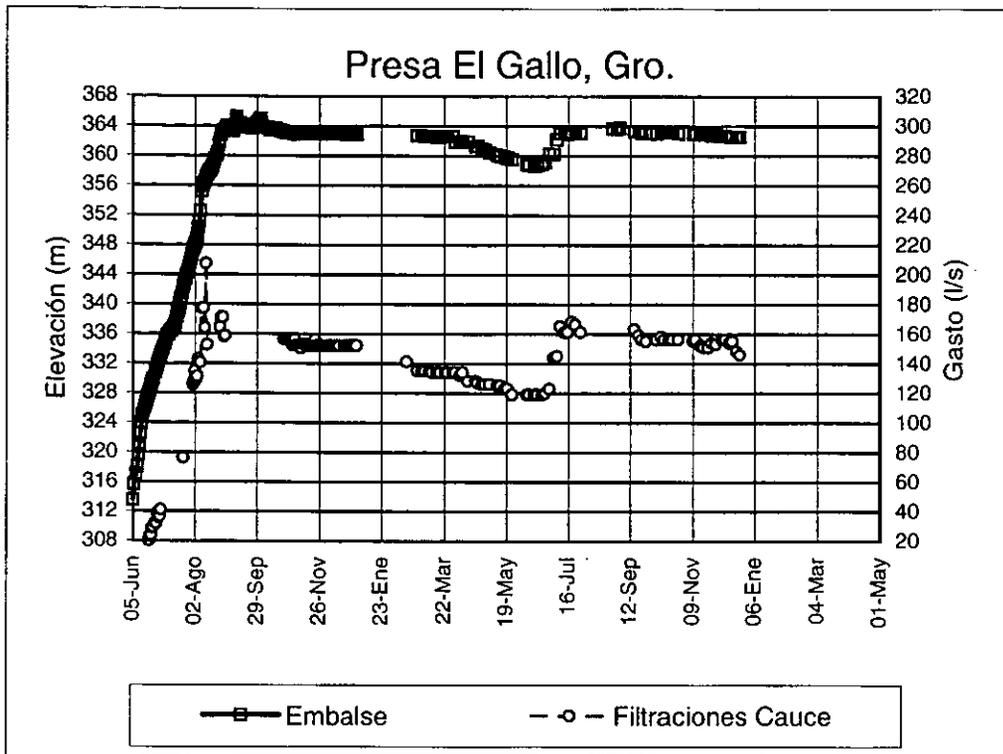


Fig. 42. Filtraciones al pie de la cortina.

CONCLUSIONES.

De este trabajo se desprende que es importante el realizar un levantamiento geológico previo a la construcción de una obra civil, para con ello prevenir problemas que pudieran presentarse durante el desarrollo de ésta.

Los conocimientos previos de las características de la región ayudan a la planeación del tratamiento de la cimentación, para esto no basta con conocer las unidades litológicas que forman la boquilla, sino también las condiciones estructurales y de permeabilidad que presenta el macizo rocoso.

Con estos datos se puede saber si es necesario o no realizar algún tipo de tratamiento en la zona de cimentación, donde se desplantará la cortina y en caso afirmativo se elabora el proyecto y desarrollo del mismo. El conocer el tipo de discontinuidades que afectan al macizo y sus características (abertura, continuidad, relleno, longitud, orientación, etc.), sirve para planear el tipo de lechada a emplear y la inclinación y orientación de los barrenos de inyección.

Los avances en la tecnología han alcanzado a los tratamientos de cimentaciones, ayudando a que cada día sean realizados con mayor eficacia, llevando un mejor control de los materiales inyectados por medio de programas de computación.

Con los barrenos de investigación que fueron realizados se comprobó que no existe correlación entre la absorción de agua y el consumo de cemento, confirmando así que la permeabilidad residual existente se debe a fisuras muy finas que no son inyectables con las técnicas utilizadas. Con esto, se puede concluir que la permeabilidad de la roca no implica la inyectabilidad de la misma, por ello, es necesario el realizar barrenos de evaluación en los que se efectúen ensayos de absorción de agua e inyectados de prueba, previos a los tratamientos de cimentación, para así saber si la formación es o no inyectable, ya que como se pudo ver en este caso de la presa "El Gallo", el tratamiento de inyección solo logró dañar más a la roca provocando el hidrofracturamiento sin disminuir la permeabilidad de ésta.

Las lecturas registradas entre junio de 1998 (fecha del primer llenado de la presa) y enero del 2000, no reportan ninguna alteración importante en los niveles de los piezómetros, al igual que los gastos de las filtraciones medidas en la ataguía de aguas abajo, en la margen izquierda y en la zona del túnel de desvío, las cuales al parecer se han estabilizado mostrando solo pequeñas variaciones, reflejo de los cambios registrados en el nivel del embalse.

Las altas cargas registradas en los piezómetros reflejan que todavía existe una subpresión importante en la zona del núcleo y en el respaldo aguas abajo, indicativo de la baja efectividad de la pantalla.

Hasta el momento, el funcionamiento de la presa es adecuado, sin embargo considero que se debe de continuar con la lectura de la instrumentación y estar al pendiente de cualquier variación en los gastos de las filtraciones y en los niveles piezométricos, previniendo algún tipo de erosión interna que se pudiera generar en la presa.

BIBLIOGRAFÍA.

- Campa Uganda, Ma. Fernanda 1978. La evolución tectónica de Tierra Caliente, Gro. Bol. Sociedad geológica Mexicana, tomo XXXIX, No. 2.
- Campa Uganda, Ma. Fernanda, Ramírez, J, 1979. La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero. Serie Técnico científica. Universidad Autónoma de Guerrero. N o. 10
- Centeno García Elena, 1993. Geology of the Southern part of the Guerrero Terrain, Cd Altamitano - Teloloapan area. Terrane geology of southern Mexico. Guide book of field trip B.
- C.F.E. 1995. Pérez Gutierrez Rosalva. Informe de factibilidad geológica del proyecto equipamiento el Gallo Río Cutzamala, Gro. Tomo 1. México. (Inédito).
- C.F.E. 1995. Sánchez Martínez Cutberto, Sánchez Pérez Juan. Informe geológico como complemento a la factibilidad del P.H. Equipamiento el Gallo, Gro. México. (Inédito).
- C.F.E. 1998. Lechuga Valderrábano Florencio. Integración geológica del proyecto Presa "El Gallo", Gro. (Inédito).
- C.F.E. 1998. Presa el Gallo, Gro. Primer informe de instrumentación. México. (Inédito).
- C.F.E. Dic. 1998. Valdemar Carbajal Matildes, Chávez Ramírez Luis. Presa el Gallo, Gro. Memoria de Instrumentación. México. (Inédito).
- C.F.E.. 1997. González Valencia Francisco, Mena Zandoval Enrique. Presa el Gallo, Gro. Proyecto de instrumentación y propuesta económica. México. (Inédito).
- C.F.E..2000. Hernández Cruz Luis E. Presa el Gallo, Gro. Estado actual de la presa. México(Inédito).
- C.I.E.P.S. S.C. Ingenieros Consultores y Proyectistas Mexicanos. 1982. Estudio y proyecto de la presa "El Gallo". Estudio Geológico. México D.F.
- C.N.A. 1990. Tratamiento de la cimentación, presa "El Gallo", Gro. Reporte interno. (Inédito).
- C.N.A. 1999. Memoria descriptiva de la construcción de la presa "El Gallo". México.
- C.N.A. 2001. Presas de México. Vol. XVII. México
- C.N.A. Consultivo Técnico. 1999. Alfaro Nava Paul. Presa "El Gallo". Análisis del tratamiento de inyectado de la pantalla impermeable y del tapete de consolidación. México D.F. (Inédito).
- C.N.A. Hungsberg Ulrich 2001. Desarrollo del inyectado en roca para presas en México. (Ponencia presentada en Wildegg, Suiza). México, D.F.

- C.N.A. Consultivo Técnico. 1998. Manual para capacitación en seguridad de presas. Inspección de vertedores y obras de desfogue. Subdirección General Técnica.
- De Cserna, Z. 1982. Resumen de la geología de la hoja Tejupilco Estados de Guerrero, México y Michoacán. UNAM, Instituto de Geología.
- De Cserna, Z., Palacios-Nieto, Pantoja- Alor. 1978. Relaciones de facies de las rocas cretácicas en el noroeste de Guerrero y áreas colindantes del Estado de México y Michoacán. Libro guía de la excursión geológica a Tierra Caliente. UNAM. Revista Instituto de geología., vol. 2, núm. 1.
- Deere Don W. 1997. Presa "El Gallo", Gro. Evaluación del tratamiento de la cimentación. Rocky Mountain Consultants, Inc. C.N.A. Consultivo Técnico. (Inédito).
- Edwards, J.D. 1995. Studies of some Early Tertiary Red Conglomerates of Central México: Geol. Surv. Prof. Paper 264-H, 185 p.
- Ewert F.K. 1997. Presa "El Gallo", Gro. Revisión del tratamiento de la cimentación. C.N.A. Consultivo Técnico. (Inédito).
- Fries, C. Jr. 1957. Bosquejo geológico de la región entre México, D.F. y Acapulco, Guerrero. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol. Vol. 9, p. 287-333.
- Fries, C. Jr. 1960. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. UNAM, Instituto de Geología vol. 60.
- Hungsberg Ulrich, Escalante Arias Horacio. 2000 Apuntes sobre tratamientos de cimentaciones para presas de materiales graduados. Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. México D.F.
- Juarez Badillo, Eulalio. 1979. Mecánica de suelos. Tomo III. Flujo de agua en suelos. Limusa. México
- López Ramos E. 1978. Geología de México. Tomos II y III. México. Segunda edición.
- Morán Zenteno D. 1984. Geología de la República Mexicana. Facultad de Ingeniería, UNAM-INEGI.
- Pantoja- Alor, J. 1959. Estudio geológico de reconocimiento de la región de Huetamo, Estado de Michoacán. Consejo de Recursos Naturales No Renovables, vol. 50. México.
- Pantoja- Alor, J. 1983. Geocronometría del magmatismo Cretácico-Terciario de la Sierra Madre del Sur. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo XLIV. No. 1.
- Raisz, E. 1964. Landforms of Mexico. Prepares for geography Brach of the Office of Naval research. Second edition, correct edition. Cambrigde, Mass.

Raúl J. Marsal, Resendiz Nuñez Daniel. 1979. Presas de tierra y enrocamiento. Limusa. México.

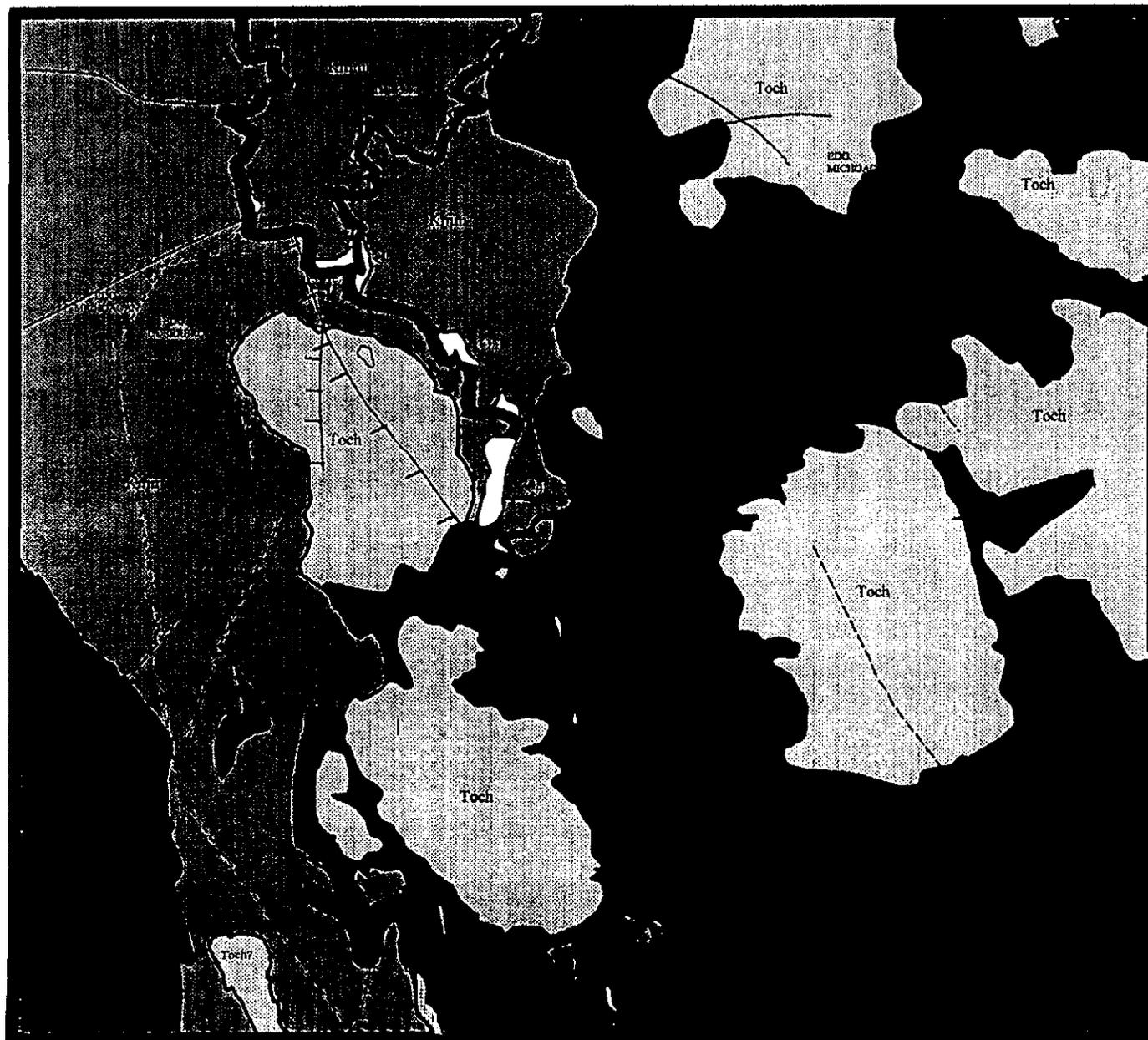
S.R.H. 1963. Consultivo técnico. Instrucciones sobre las operaciones de inyectado.

Water Power & Dam Construction, 1993. Diseño y control del inyectado empleando el principio "GIN".

www.inegi.gob.mx

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

COLUMNA LITOLÓGICA.



Depósitos no consolidados:
Aluvión (Oal).



Diques de composición andesítica
(Tia)



Intrusivo hipabissal (Tma).



Serie volcánica Characharando
(Toch). Derrames de lavas, tobas y
brechas andesíticas.



Formación Balsas (Tb).
Conglomerado, brechas, areniscas
limolitas de origen continental,
principalmente lacustre de color rc
café.



Formación Malpaso (Ksm).
Alternancia de areniscas de grano
fino a medio y lutitas.



Formación Morelos (Kmm).
Calizas estratificadas.



Intrusivo diorítico (Kds).



Formación San Lucas (Ksl).
Areniscas, limolitas y lutitas. Así
como tobas intercaladas

SÍMBOLOS

Falla normal

Lineamiento geológico

Lineamiento
fotogeológico

Límite de estado



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
MARTHA A VÁZQUEZ
HDEZ.

PRESA "EL GALLO"
GEOLOGÍA
REGIONAL

Datos y planos proporcionados
por la Comisión Nacional del
Agua

Plano No. 1



COLUMNA LITOLÓGICA

Depósitos no consolidados:
Aluvión (Qal).

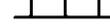
 Diques de composición andesítica (Tia)

 Intrusivo hipabisal (Tma).

 Serie volcánica Characharando (Toch). Derrames de lavas, tobas y brechas andesíticas.

 Formación Balsas (Tb). Conglomerado, brechas, areniscas y limolitas de origen continental, principalmente lacustre de color rojo café.

SÍMBOLOS

Falla normal 

Lineamiento geológico 

Lineamiento fotogeológico 

Límite de estado 

Sección geológica 

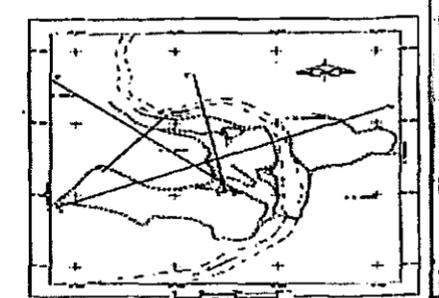
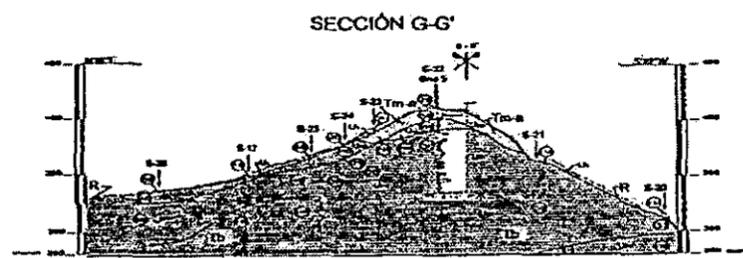
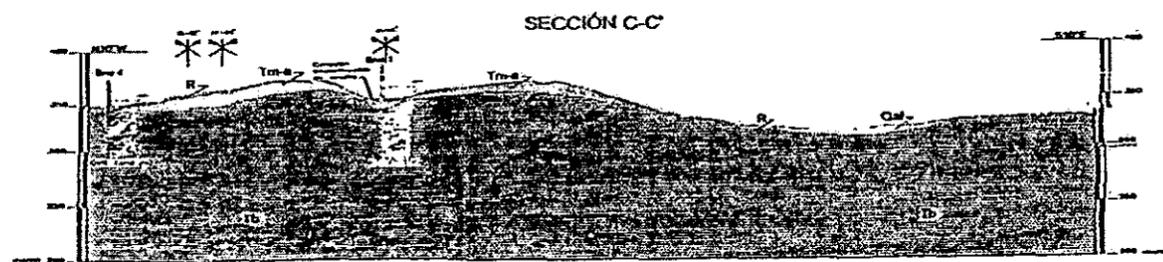
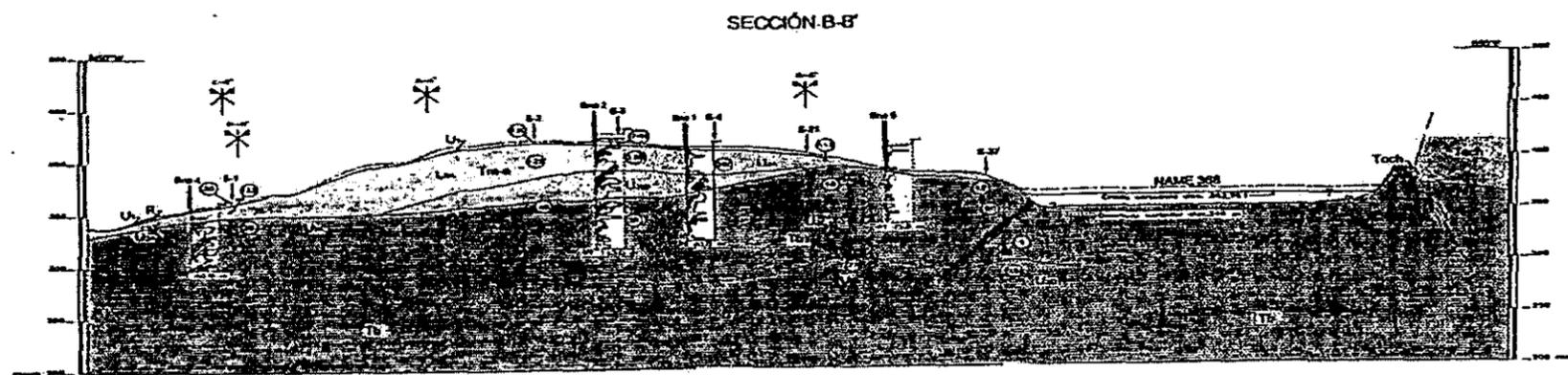
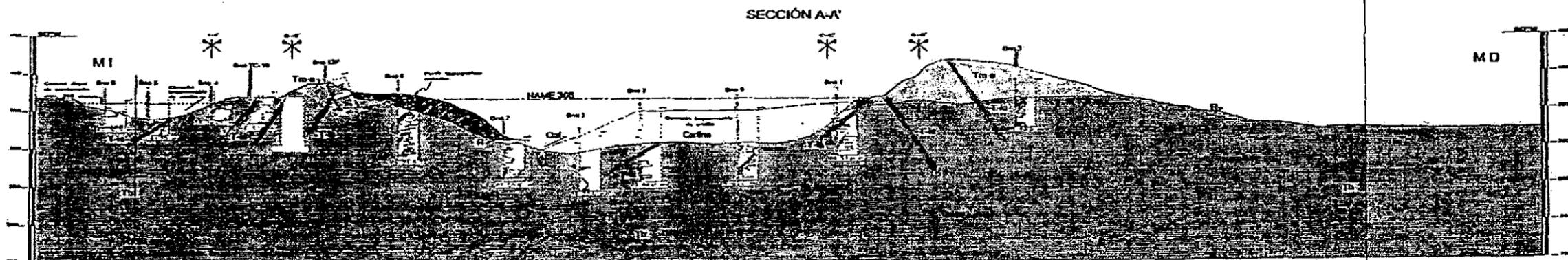


UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
MARTHA A VÁZQUEZ
HDEZ.

**PRESA "EL GALLO"
GEOLOGÍA DE LA
BOQUILLA**

Datos y planos proporcionados
por la Comisión Nacional del
Agnia

Plano No. 2



Explicación

Rocas ígneas		Rocas sedimentarias no consolidadas	Depositos
Calizas	Intrusivas		
[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol] Resaca/Abundón
[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol] Depósito de composición andesítica
[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol] Perfilado andesítico local
[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol] Perfilado Chocomaucos (serenas de lava, labos y brechas andesíticas)
[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol] Formación Depaso (conglomerados, arenas y limolitas de origen continental principalmente fluvial de color rojo y café)

Simbolos

Geológicas

Contacto geológico _____

Dique emplazado en faja normal _____

Dique _____

Fractura geológica _____

Falla normal _____

Barrano (etapa 1983)

No. de terreno _____ Eto 4

E de R00 _____ E

Nivel freático _____

Profundidad total _____

(Etapas 1992) (Etapas 1994) (Etapas 1995) (Etapas 1997)

Geofísicos

Frontera geofísica _____

Interfase geofísica _____

Resistividad eléctrica (n-m) _____

Sondeo eléctrico variable _____

Unidad geofísica _____

Topográficos

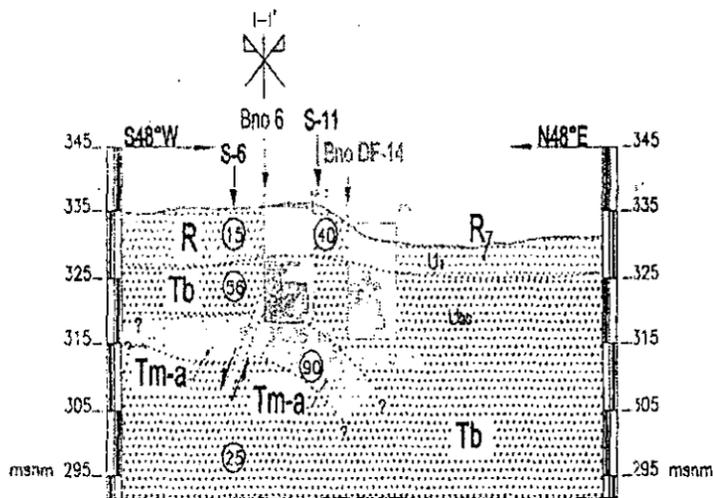
Rumbo de sección _____ S30°W

Cruce de sección _____

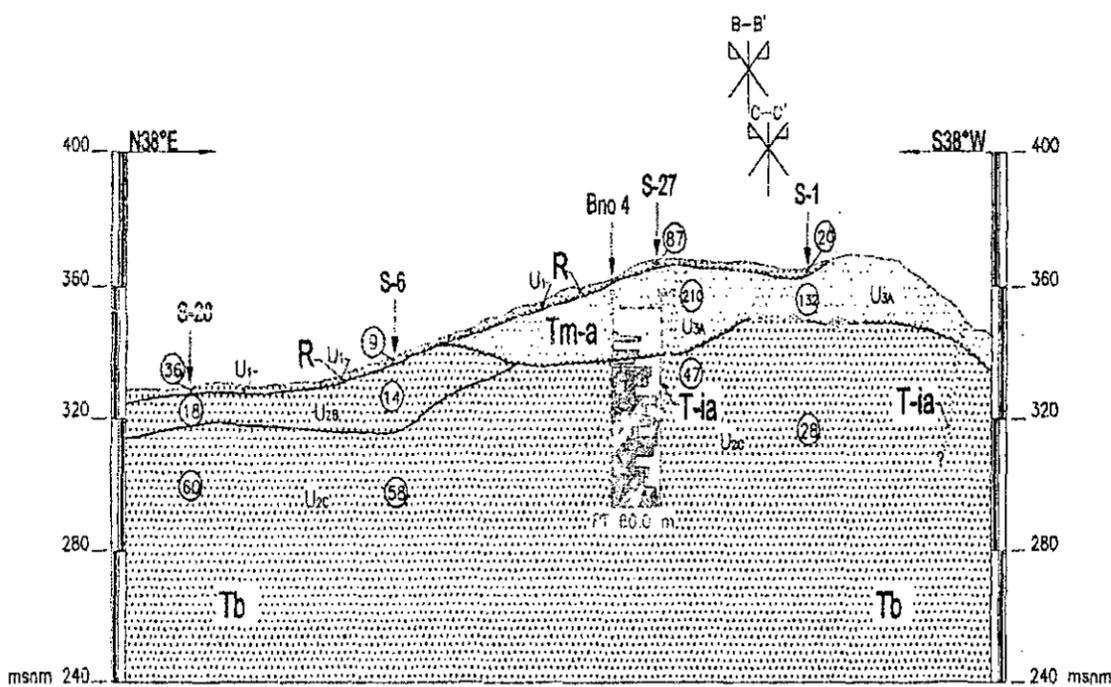
Esc. 1: 2000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 MARTHA ADRIANA VÁZQUEZ HERNÁNDEZ
 PRESA EL GALLO, G.R.O.
 Secciones Geológico - Geofísicas del sitio
 Planos y datos proporcionados por la CNA Plano No 3

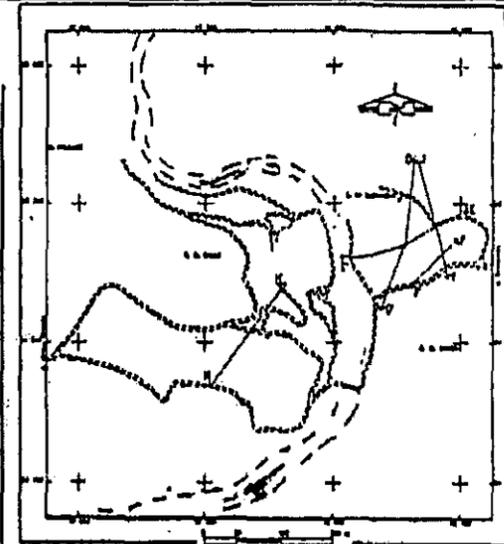
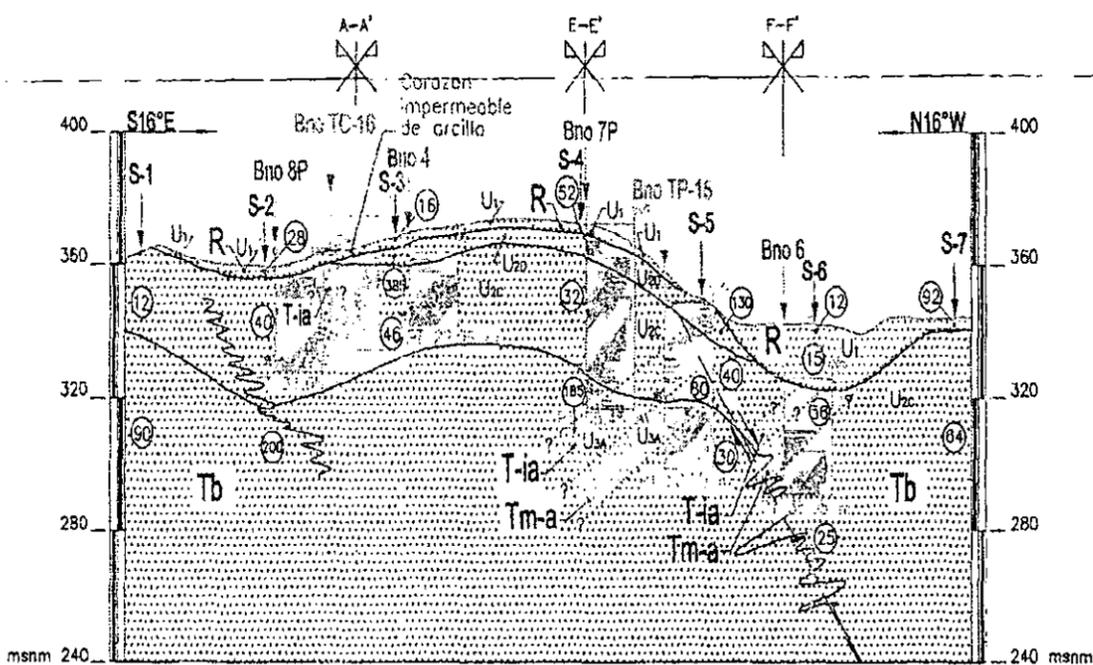
SECCIÓN F-F'



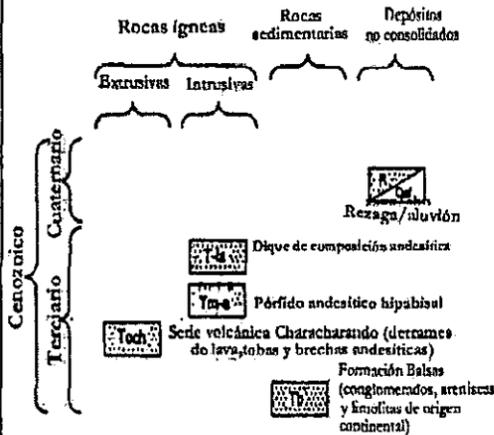
SECCIÓN H-H'



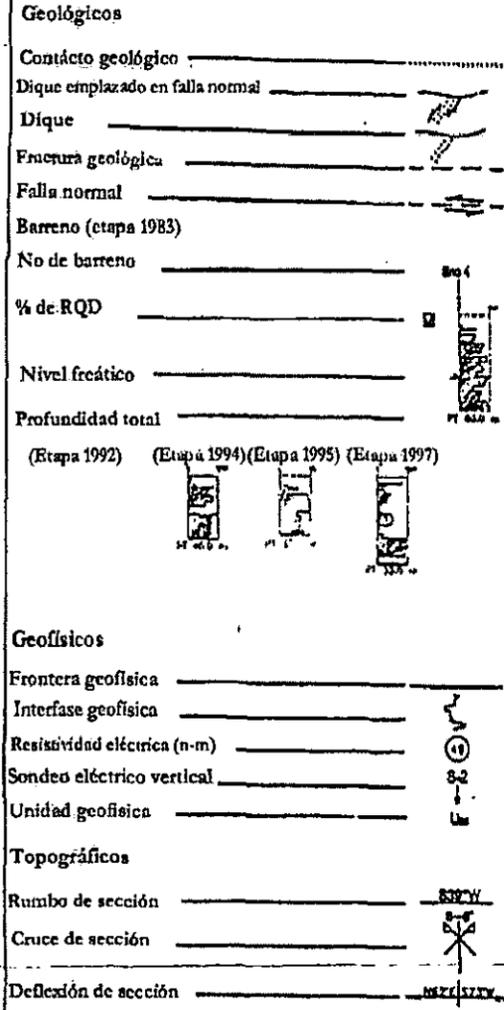
SECCIÓN I-I'



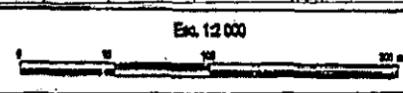
Explicación



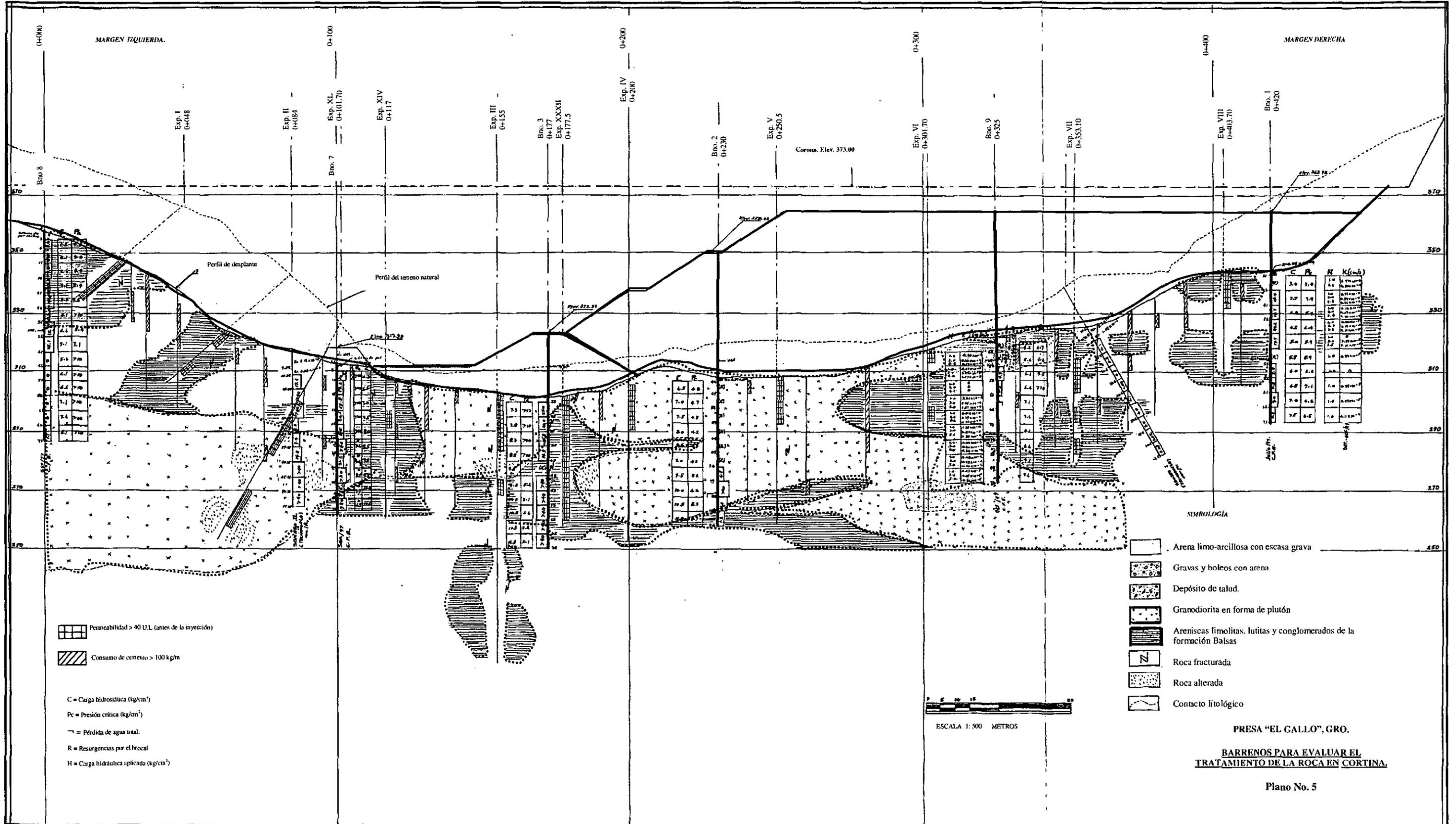
Símbolos



Características de unidades geológicas					
Unidad geológica	Subunidad	Resistividad aparente (ohm m)	Velocidad aparente (km/s)	Espeesor (m)	Correlación geológica
U1	U1a	0-200	0.5-0.8	hasta 10	Formación Balsas (areniscas y limolitas)
U1	U1b	0-70	0.8-1.5	hasta 20	Formación Balsas (areniscas y limolitas)
U1	U1c	70-85	2.2	de 0 a indeterminada	Formación Balsas (areniscas y limolitas)
U1	U1d	100-200	2.0-4.0	indeterminada	Formación Balsas (areniscas y limolitas)
U1	U1e	80-450	0.9-1.5	hasta 40	Formación Balsas (areniscas y limolitas)
U1	U1f	100-400	2.0-3.0	hasta 20	Formación Balsas (areniscas y limolitas)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 MARTHA A. VÁZQUEZ HDEZ
 PRESA EL GALLO, GRO.
 Secciones Geológico- Geofísicas del sitio
 Planos y datos proporcionados por la Comisión Nacional del agua
 Plano No 4



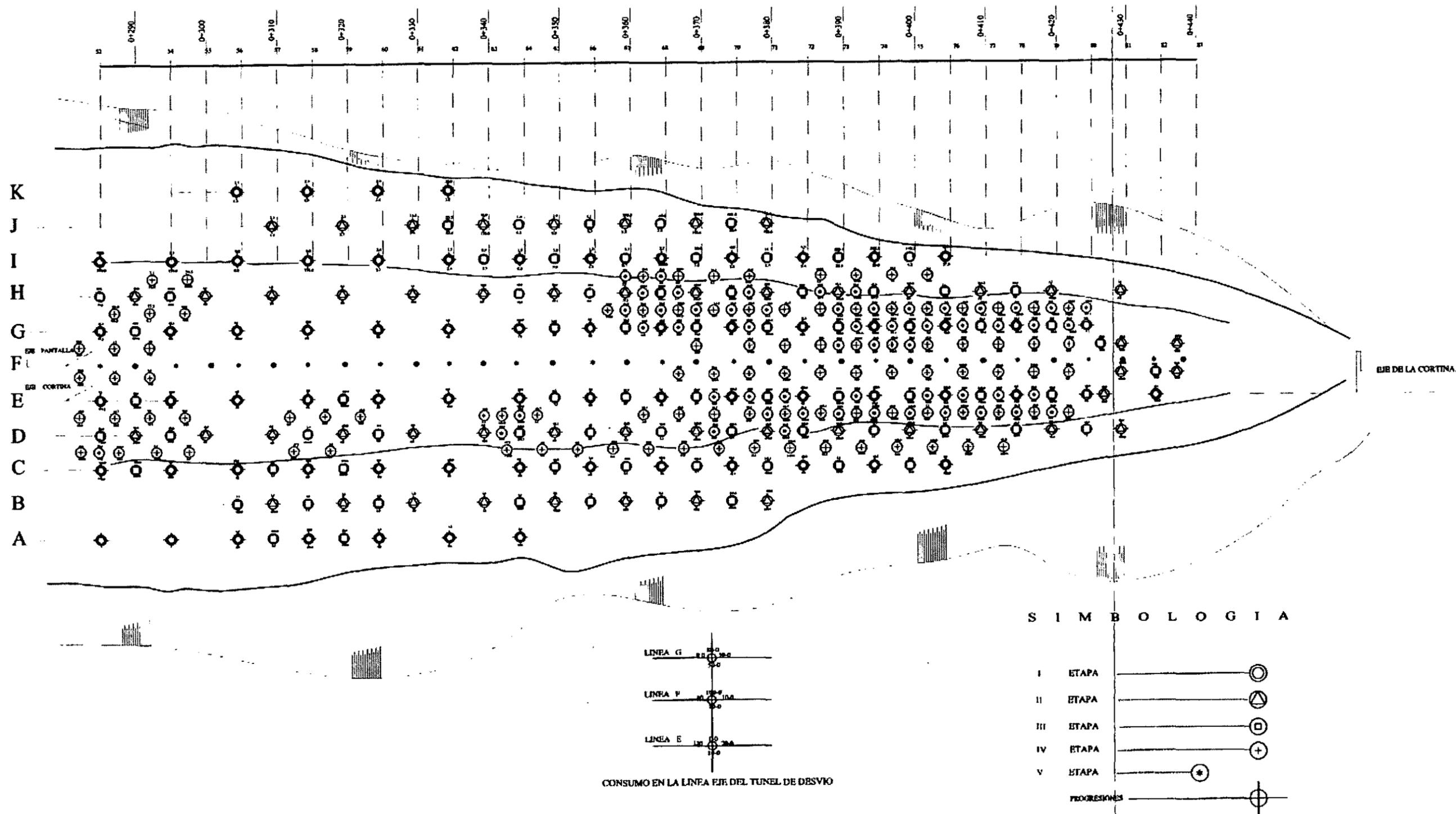
Permeabilidad > 40 U.L. (antes de la inyección)
 Consumo de cemento > 100 kg/m

C = Carga hidrostática (kg/cm²)
 Pc = Presión crítica (kg/cm²)
 T = Pérdida de agua total.
 R = Resurgencias por el brocal
 H = Carga hidráulica aplicada (kg/cm²)

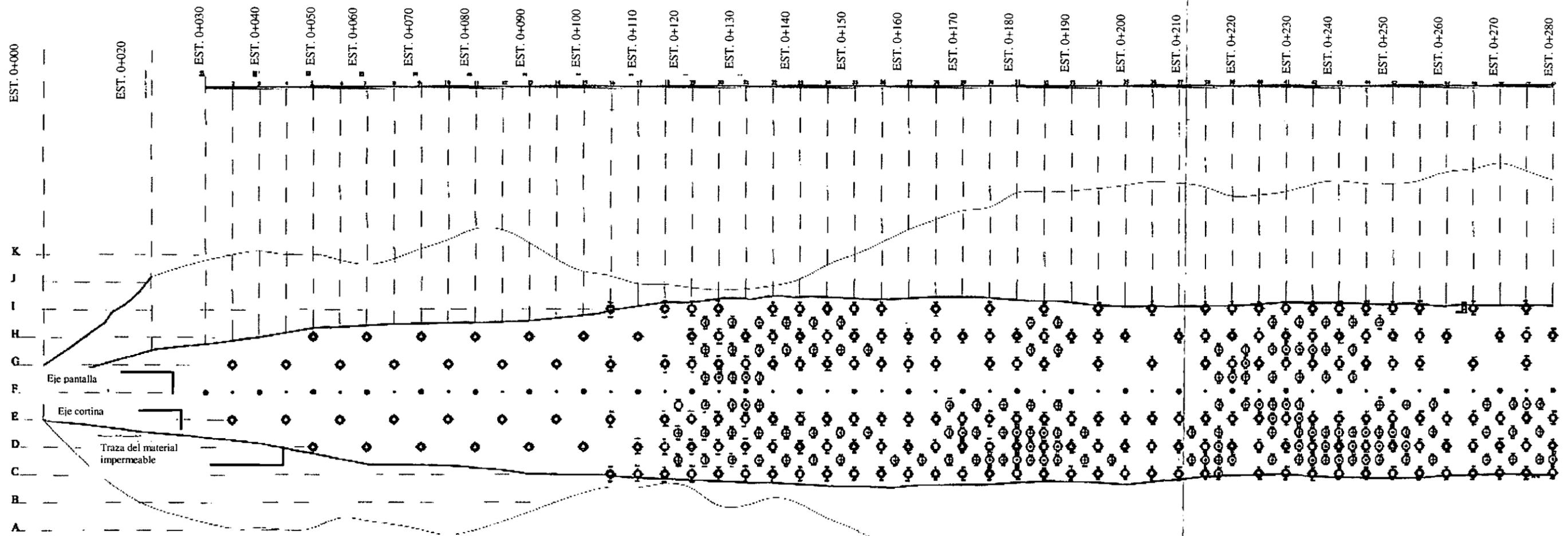
- SIMBOLOGÍA**
- Arena limo-arcillosa con escasa grava
 - Gravas y boleos con arena
 - Depósito de talud.
 - Granodiorita en forma de plutón
 - Areniscas limolitas, lutitas y conglomerados de la formación Balsas
 - Roca fracturada
 - Roca alterada
 - Contacto litológico

ESCALA 1:500 METROS

PRESA "EL GALLO", GRO.
 BARRENOS PARA EVALUAR EL
 TRATAMIENTO DE LA ROCA EN CORTINA.
 Plano No. 5



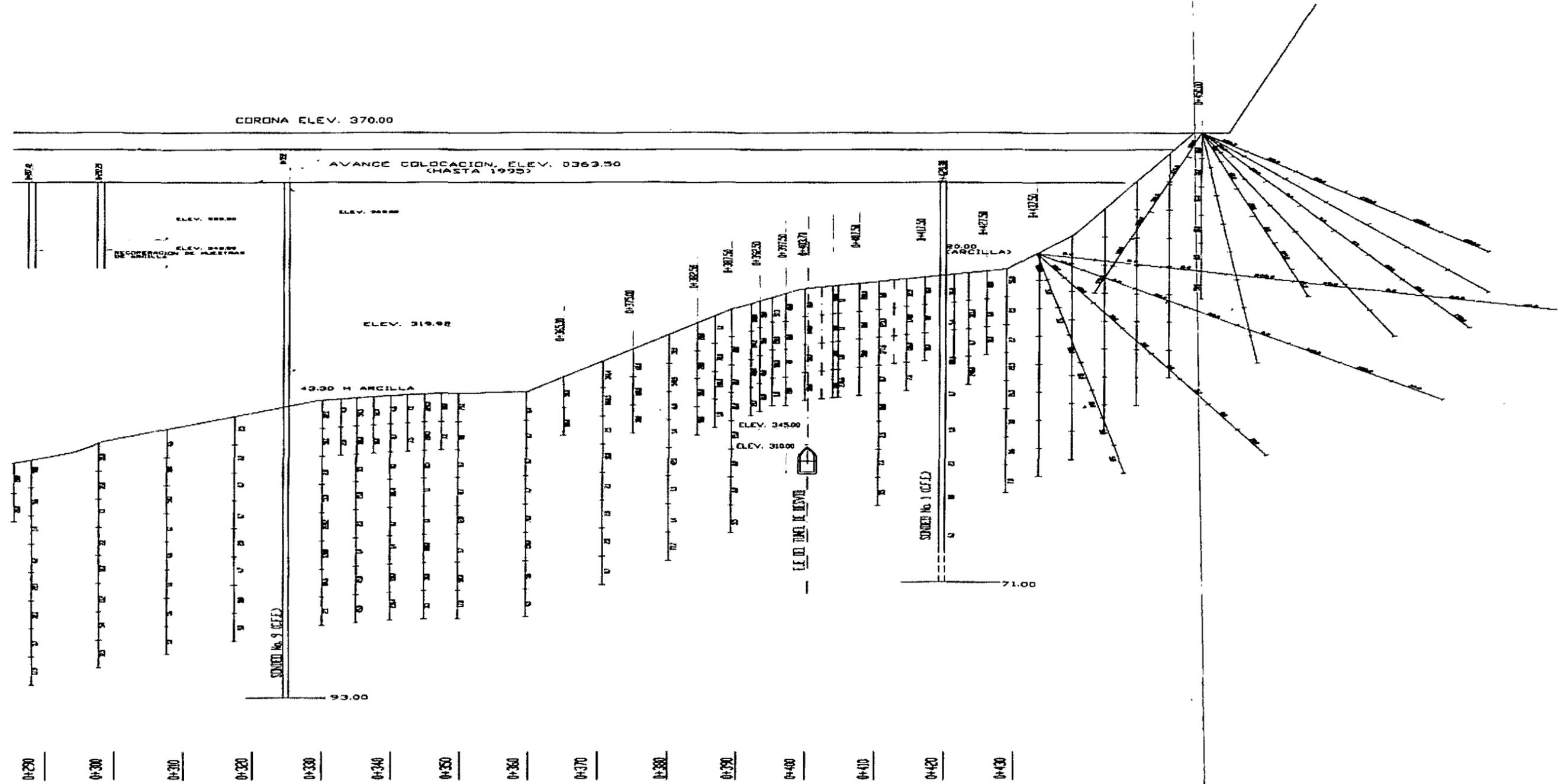
Plano 6. Inyectado de consolidación cortina, ladera derecha
Presa "El Gallo", Gro.



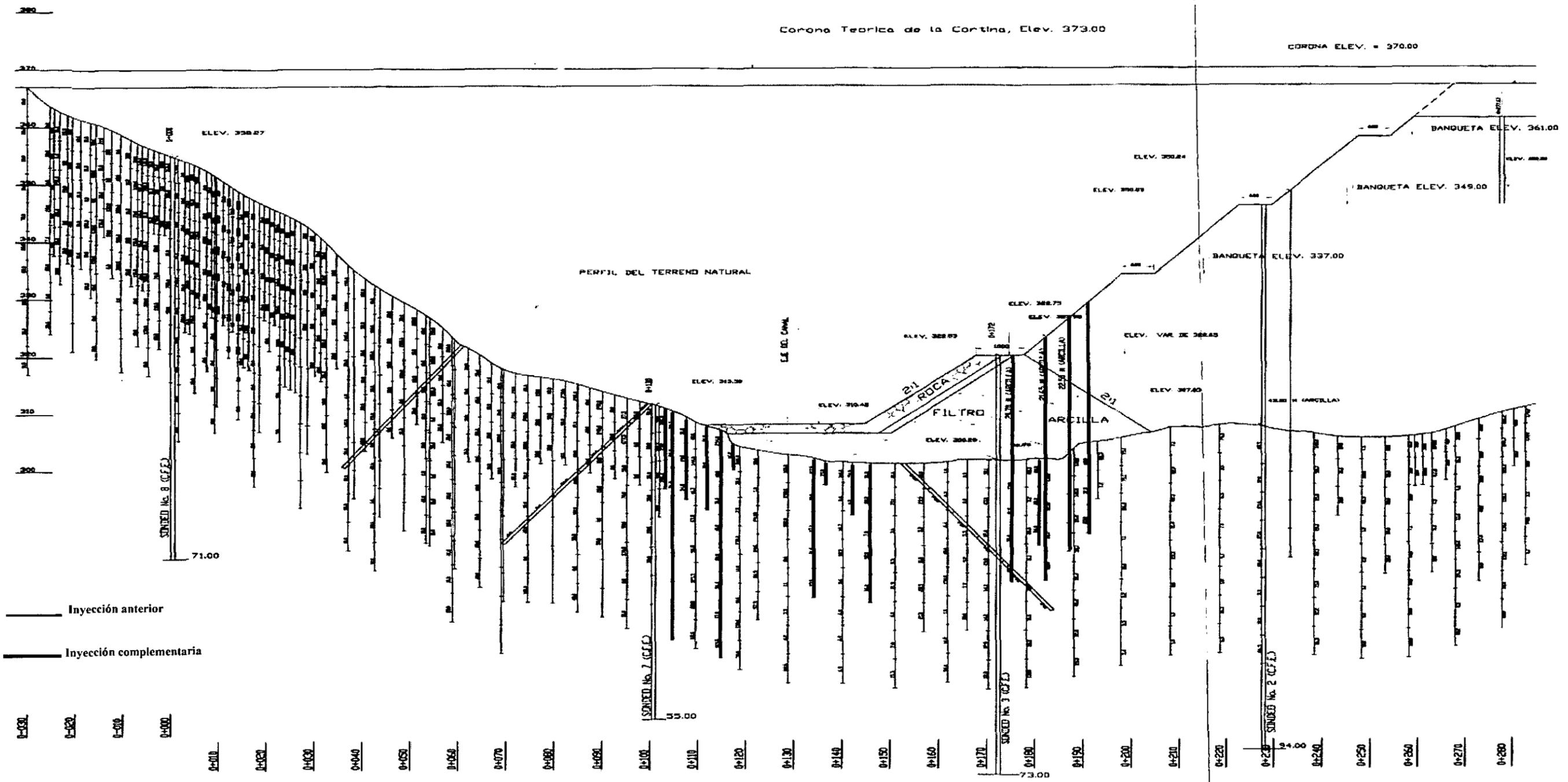
S I M B O L O G I A

- I ETAPA
- II ETAPA
- III ETAPA
- IV ETAPA
- V ETAPA
- PROGRESIONES

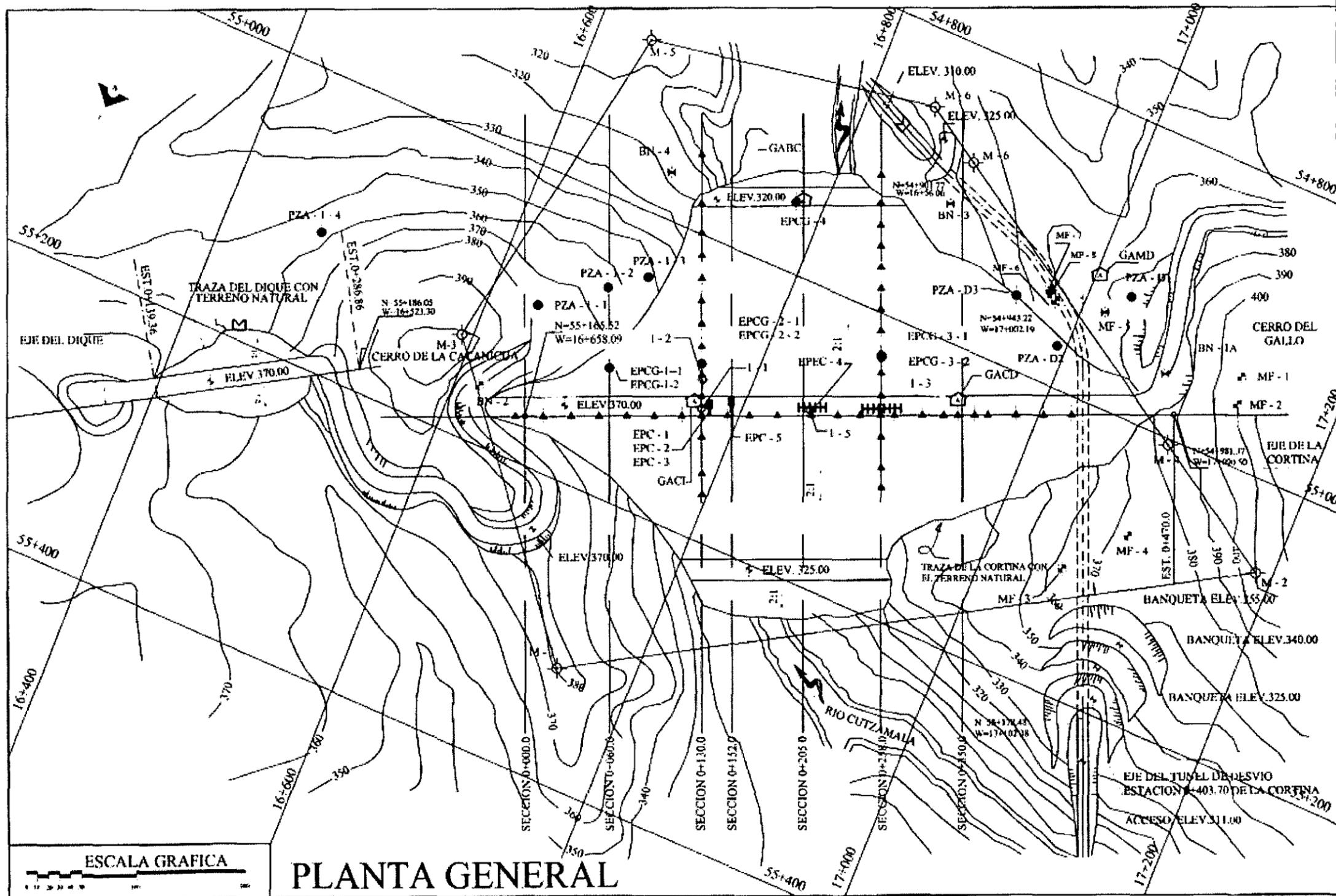
Plano 7. Inyectado de consolidación cortina, ladera izquierda
 Presa "El Gallo", Gro.



Plano 8. Tratamiento de la cimentación. Pantalla impermeable, margen derecha. Presa "El Gallo", Gro.



Plano 9. Tratamiento de la cimentación. Pantalla impermeable, margen izquierda y cauce. Presa "El Gallo", Gro.



- ### SIMBOLOGIA
- ⊙ CENTRAJE FORZOSO PARA DISTANCIOMETRO
 - ⊕ BANCO DE NIVEL
 - ⊙ MIRA FIJA
 - ▲ REFERENCIAS SUPERFICIALES CON CENTRAJE FORZOSO
 - ⊙ INCLINOMETROS
 - PIEZOMETROS ABIERTOS
 - ⊕ ACCELEROGRAFO DIGITAL Y CASETA
 - ⊕ DISPOSITIVO DE AFORO
 - ⊕ PIEZOMETROS ELECTRICOS
 - HHH EXTENSOMETROS DE PLACA DE 1.5m DE LONGITUD UBICADOS EN LA DISTANCIA 0+006.115

Plano 10. Instrumentación de la cortina.
Presa "El Gallo", Gro.

ANEXO II

BARRENOS DE EXPLORACIÓN

PROF (m)	EXP. I EST. 0+048				EXP. II EST. 0+084.70				EXP. XI EST. 0+101.70				PROF (m)	EXP. XI EST. 0+101.70				EXP. XIV EST. 0+117				PROF (m)				
	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV (m)	RECUP %	ROD %	UNIDADES LUGEOON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV (m)	RECUP %	ROD %	UNIDADES LUGEOON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV (m)		RECUP %	ROD %	UNIDADES LUGEOON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV (m)	RECUP %	ROD %	UNIDADES LUGEOON 20 40 60 80					
1	Brocal	364.44				Brocal	340.05				Brocal	326.51				Brocal	316.08				Brocal	316.08				
2		367.47	16	6																						
3																										
4		360.60	52	34	>100																					
5																										
6		358.44	42	25			335.05																			
7																										
8																										
9																										
10		355.24	63	13	>100		332.45																			
11																										
12			22	0			328.75																			
13																										
14		351.44			72																					
15																										
16																										
17			51	14			324.33																			
18																										
19		346.04			74																					
20																										
21			69	27			321.35																			
22																										
23																										
24		341.34			>100		315.85																			
25																										
26			67	2																						
27																										
28																										
29		336.15			64																					
30																										
31			90	57			310.05																			
32		332.19																								
33																										
34																										
35			95	45			305.93																			
36																										
37		328.64																								
38																										
39		326.24			67		302.40																			
40																										
41																										
42			97	80			300.05																			
43																										
44																										
45		319.99			66		297.10																			
46																										
47		317.89																								
48																										
49			81	8			293.11																			
50		314.94																								
51																										
52																										
53																										
54																										
55																										
56																										
57																										
58																										
59																										
60																										
61																										
62																										
63																										
64																										

Elaborado por: C.I.E.P.S., S.C. para la Comisión de Aguas del Valle de México según Contrato N° CAVM-78-118

C.I.E.P.S., S.C.
Interpretó: [Firma]
Revisó: [Firma]
Aprobó: [Firma]

GAL-014

S. A. R. H.

Revisó: [Firma] Aprobó: [Firma]

SIMBOLOGIA:

- Granodiorita en forma de plutón
- Areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados de la formación Balsas
- Roca fracturada
- Roca alterada
- Tramo no probado con pruebas de permeabilidad
- Nivel del subálveo
- Profundidad del tubo de ademe
- Tramo cementado
- Pérdida parcial del agua de enjuague
- Pérdida total del agua de enjuague

NOTAS:

La ejecución de las exploraciones y las pruebas de permeabilidad Lugeon y Lefranc fue realizada bajo la supervisión de CIEPS, S.C.

En las exploraciones se utilizó broca triconica de 215/16" y broca de diamante BNXL con barril muestreador NXL.

CORTINA

CARACTERÍSTICAS DE LOS SONDEOS Y PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.

HOJA 1 DE 3.

PLANOS Y DATOS PROPORCIONADOS POR LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA.

PROF. (m)	EXP. III (v) EST. 0-155.00				PROF. (m)	EXP. III (v) EST. 0-155.00				PROF. (m)	EXP. III (v) EST. 0-155.00				PROF. (m)	EXP. IV (v) EST. 0-200.00				PROF. (m)	EXP. V (v) EST. 0-250.50				PROF. (m)	EXP. V (v) EST. 0-250.50 (1 m aguas abajo)			
	COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)		COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)		COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)		COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)		COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)		COLUMNA (LITROGRAFIA)	ELEV. (m)	RECOR. (%)	INDICES LITON. (%)
1					1					1					1					1					1				
2					2					2					2					2					2				
3					3					3					3					3					3				
4					4					4					4					4					4				
5					5					5					5					5					5				
6					6					6					6					6					6				
7					7					7					7					7					7				
8					8					8					8					8					8				
9					9					9					9					9					9				
10					10					10					10					10					10				
11					11					11					11					11					11				
12					12					12					12					12					12				
13					13					13					13					13					13				
14					14					14					14					14					14				
15					15					15					15					15					15				
16					16					16					16					16					16				
17					17					17					17					17					17				
18					18					18					18					18					18				
19					19					19					19					19					19				
20					20					20					20					20					20				
21					21					21					21					21					21				
22					22					22					22					22					22				
23					23					23					23					23					23				
24					24					24					24					24					24				
25					25					25					25					25					25				
26					26					26					26					26					26				
27					27					27					27					27					27				
28					28					28					28					28					28				
29					29					29					29					29					29				
30					30					30					30					30					30				
31					31					31					31					31					31				
32					32					32					32					32					32				
33					33					33					33					33					33				
34					34					34					34					34					34				
35					35					35					35					35					35				
36					36					36					36					36					36				
37					37					37					37					37					37				
38					38					38					38					38					38				
39					39					39					39					39					39				
40					40					40					40					40					40				
41					41					41					41					41					41				
42					42					42					42					42					42				
43					43					43					43					43					43				
44					44					44					44					44					44				
45					45					45					45					45					45				
46					46					46					46					46					46				
47					47					47					47					47					47				
48					48					48					48					48					48				
49					49					49					49					49					49				
50					50					50					50					50					50				
51					51					51					51					51					51				
52					52					52					52					52					52				
53					53					53					53					53					53				
54					54					54					54					54					54				
55					55					55					55					55					55				
56					56					56					56					56					56				
57					57					57					57					57					57				
58					58					58					58					58					58				
59					59					59					59					59					59				
60					60					60					60					60					60				
61					61					61					61					61					61				
62					62					62					62					62					62				
63					63					63					63					63					63				

SIMBOLOGIA

- Arroyo lila o rojo con escamas verdes
- Gravas y bolitas con arena
- Gravillas en forma de palas
- Arenas, limos, lodos, pedregalitos de Formacion Blanca
- Piedra fragmentada
- Roca aligada
- Tierra no pedregada con pedruzcos de peroviolada
- Linea del sublimo
- Provolados de 1000 de volumen
- Piedras limas del tipo de elipsoide
- Piedras limas del tipo de elipsoide
- Sin recuperación
- Muestra lavada

NOTAS:
 La elevación de las sondaciones y los niveles de empuje de los sondes y Luffers son referidos bajo la superficie de CIEP3, S.C.
 En las sondaciones se utilizó base técnica de 2.18/m² y boca de diámetro BNYL con barril inyector NXL.

CORTINA
CARACTERÍSTICAS DE LOS SONDEOS Y PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.
HOJA 2 DE 3

PLANOS Y DATOS PROPORCIONADOS POR LA COMISION NACIONAL DEL AGUA.

PROF (m)	EXP. VI (v) EST. 0+301.70					EXP. VII (v) EST. 0+352.10					EXP. VIII (v) EST. 0+403.70					EXP. IX (v) EST. 0+200.00 (52m AGUAS ARRIBA)					EXP. X (v) EST. 0+200.00 (39m AGUAS ABAJO)					EXP. XXXI (v) EST. 0+250.50 (30m AGUAS ABAJO)					PROF (m)
	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	COLUMNA LITOLÓGICA	ELEV. (m)	RECUP. %	ROD. %	UNIDADES LUGUON 20 40 60 80	
1	321.96					332.27					354.71					313.51					311.86					318.16					
2		318.86	30	0	>100		329.92	28	0			352.86	30	0								308.66	0	0			317.16	31	0		
3																															
4																															
5			16	4				46	14				23	8																	
6																															
7																															
8																															
9																															
10																															
11																															
12																															
13																															
14																															
15																															
16																															
17																															
18																															
19																															
20																															
21																															
22																															
23																															
24																															
25																															
26																															
27																															
28																															
29																															
30																															
31																															
32																															
33																															
34																															
35																															
36																															
37																															
38																															
39																															
40																															
41																															
42																															
43																															
44																															
45																															
46																															
47																															
48																															
49																															
50																															
51																															
52																															
53																															
54																															
55																															
56																															
57																															
58																															
59																															
60																															
61																															
62																															
63																															

Elaborado por C.I.E.P.S., S.C. para la Comisión Nacional del Agua de México. Replic. Contrato N° CAYM-78-118

C.I.E.P.S., S.C. Integrado por: Olinos, Pineda, Herrero, Aguirre, No. 1, San Mateo, México D.F.

GAL-016 S. A. R. H. Revisado: Herrero

SIMBOLOGIA:

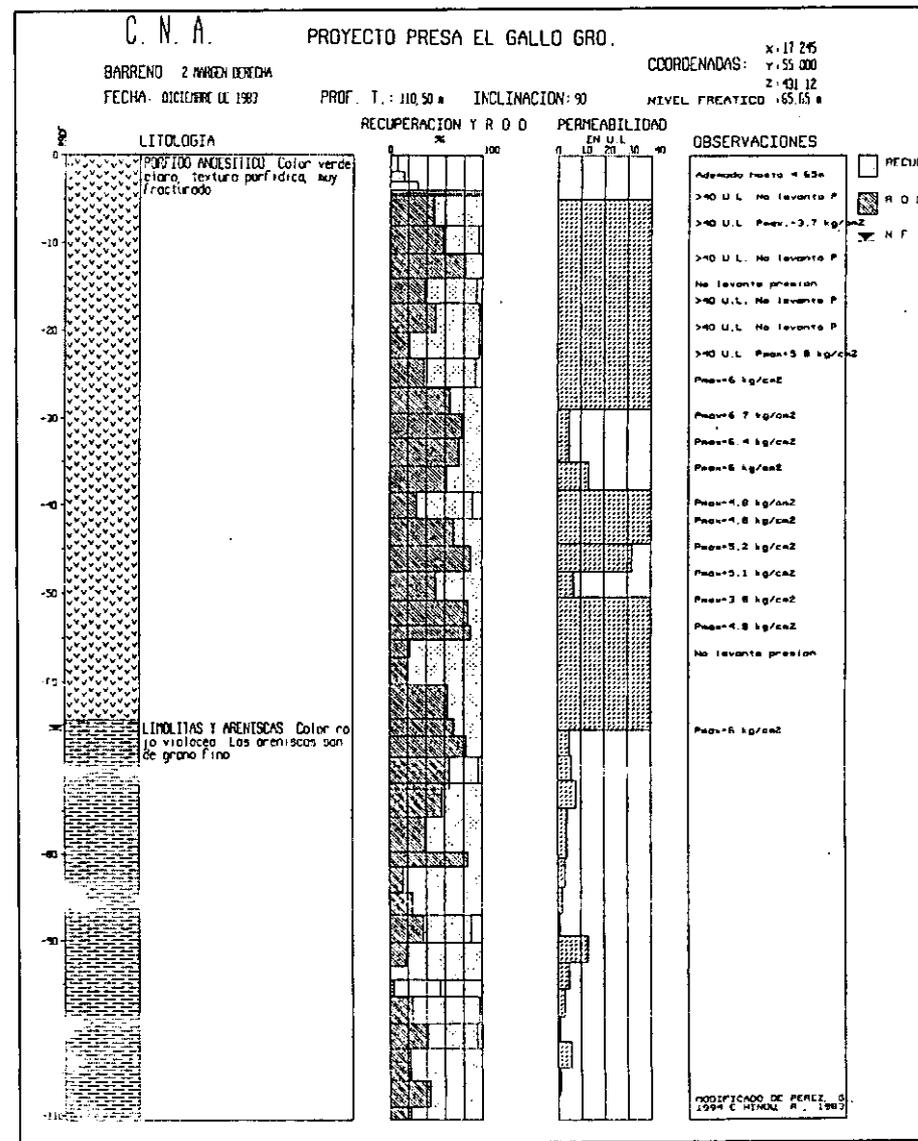
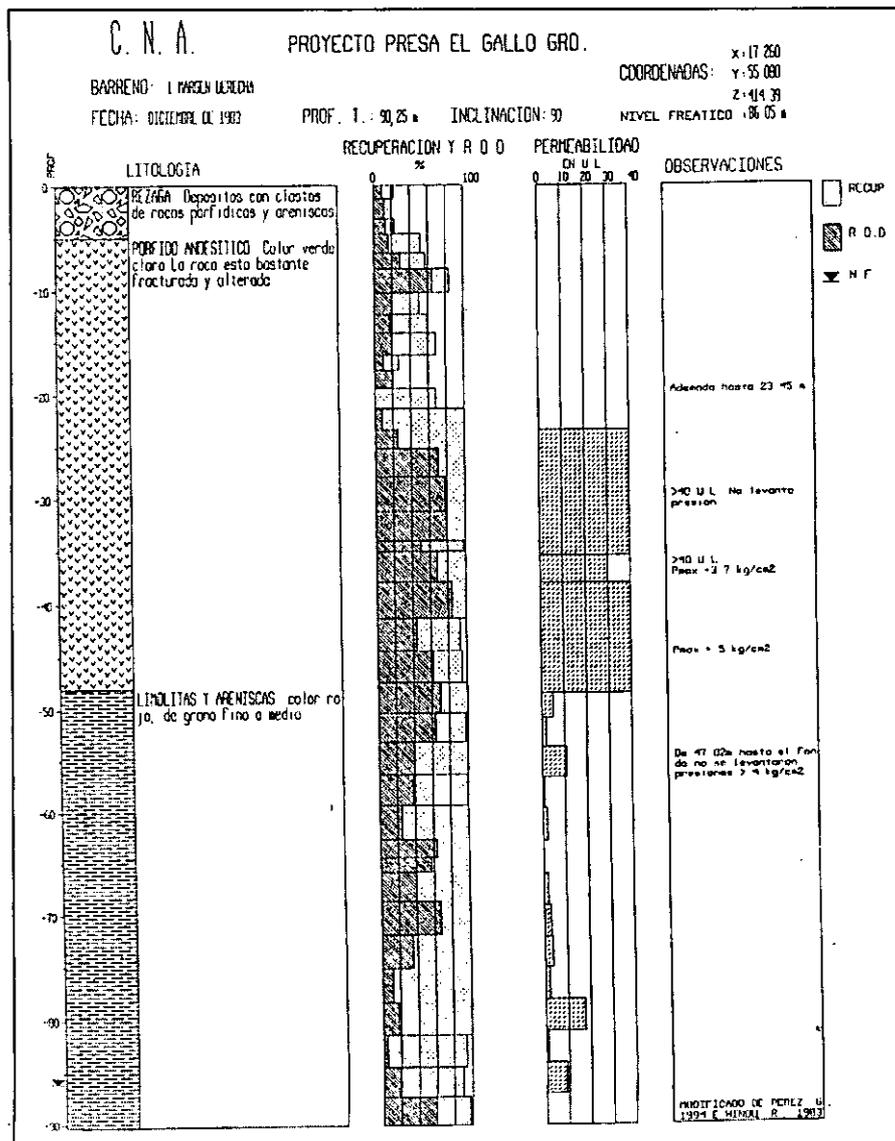
- Arena fina arenosa con escases gruesas
- Gravas y bolsones con arena
- Gravelitos en forma de placas
- Arcillas, limos, y conglomerados de la Formación Bobas
- Roca fracturada
- Roca alterada
- Trazo no probado con pruebas de permeabilidad
- Nivel del espejo del agua de estuque
- Nivel del subsuelo
- Profundidad del tubo de casing
- Trazo cementado
- Pérdida parcial del agua de estuque
- Pérdida total del agua de estuque
- Sin reconstrucción

NOTAS:
 La ejecución de las exploraciones y los pruebas de permeabilidad Lugeon y Lefranc fué realizada bajo la supervisión de CIEPSSC. En las exploraciones se utilizó broca trócano de 2 1/2" y broca de diamante BNXL con barril reestreador HXL.

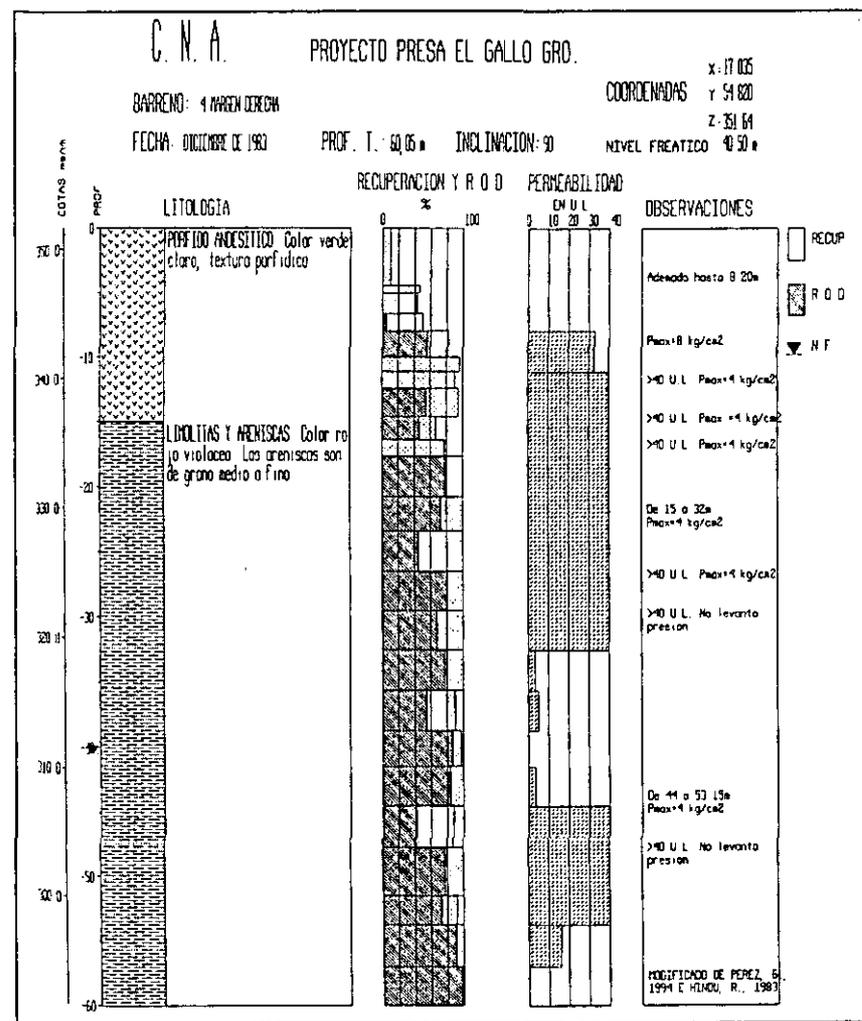
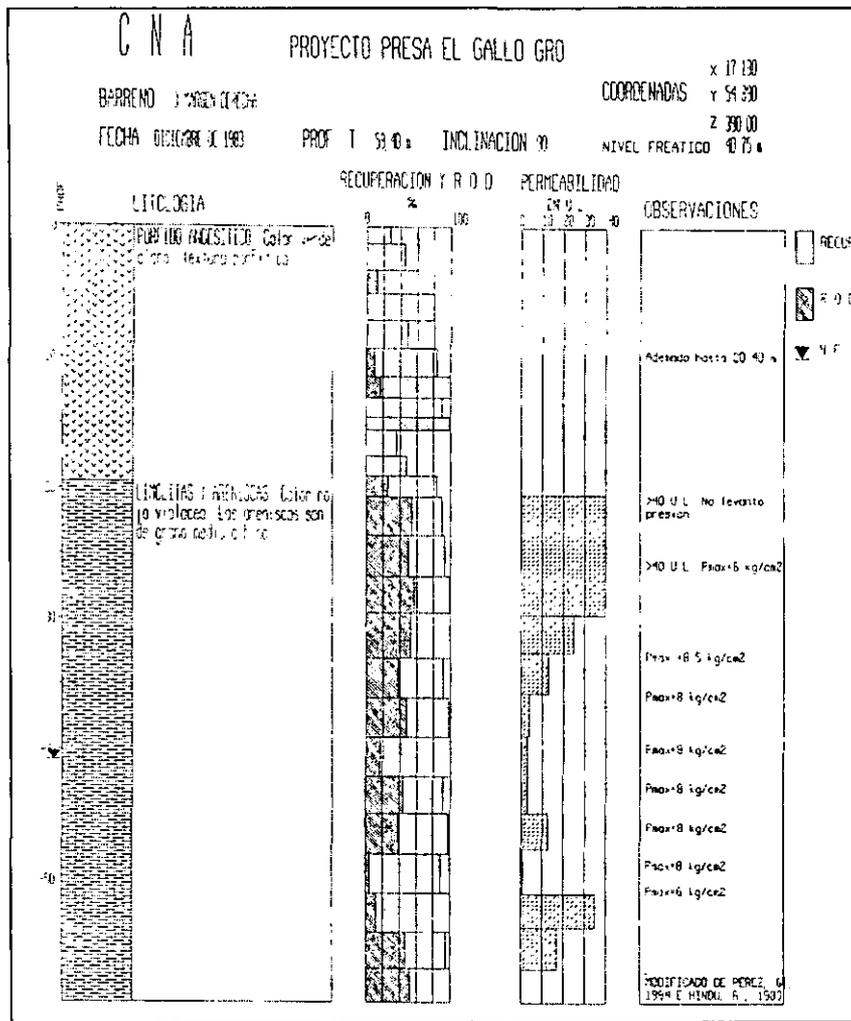
CORTINA

CARACTERÍSTICAS DE LOS SONDEOS Y PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.
HOJA 3 DE 3

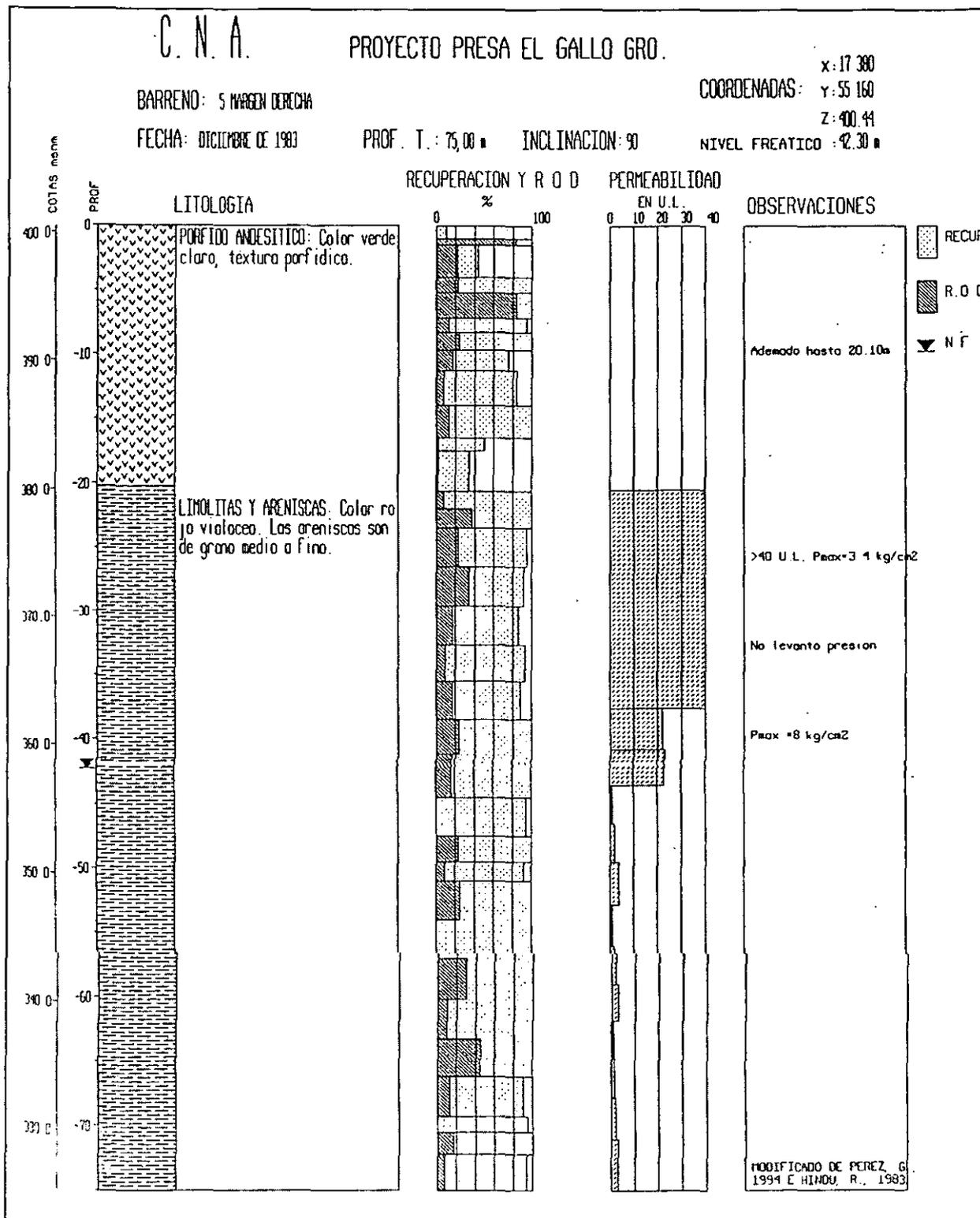
PLANOS Y DATOS PROPORCIONADOS POR LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



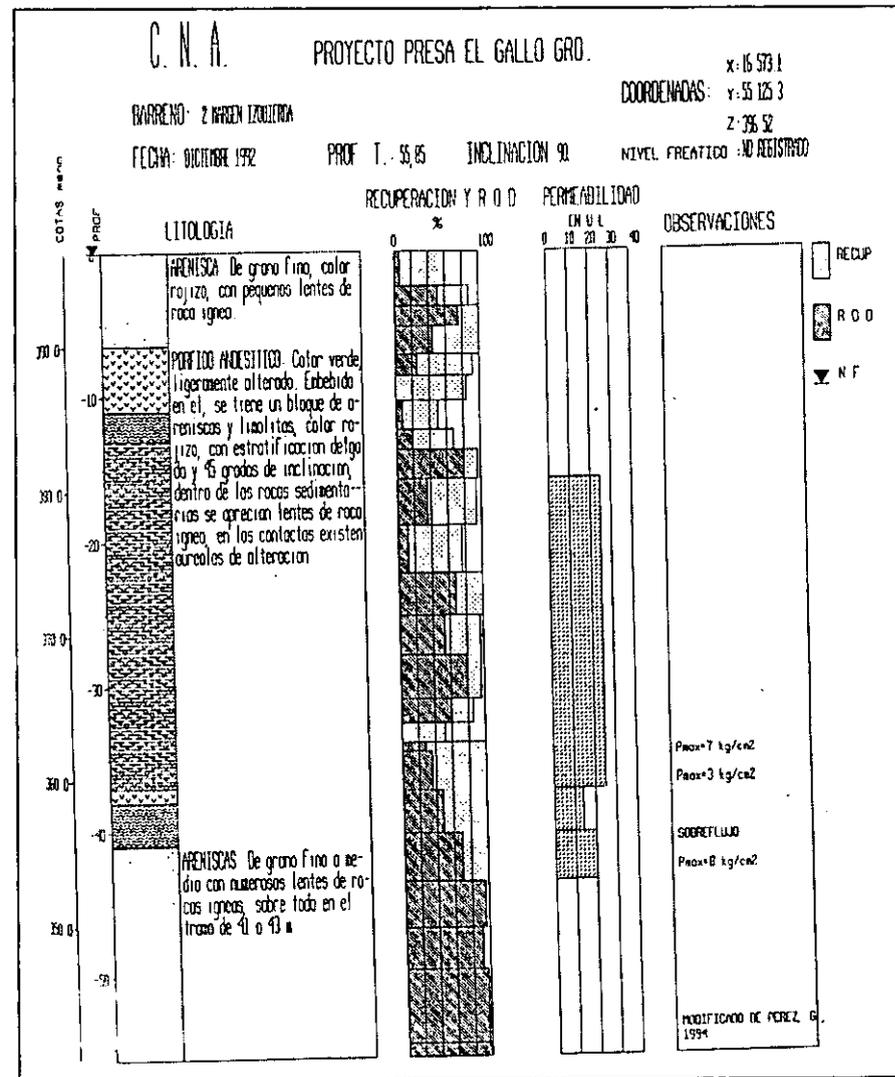
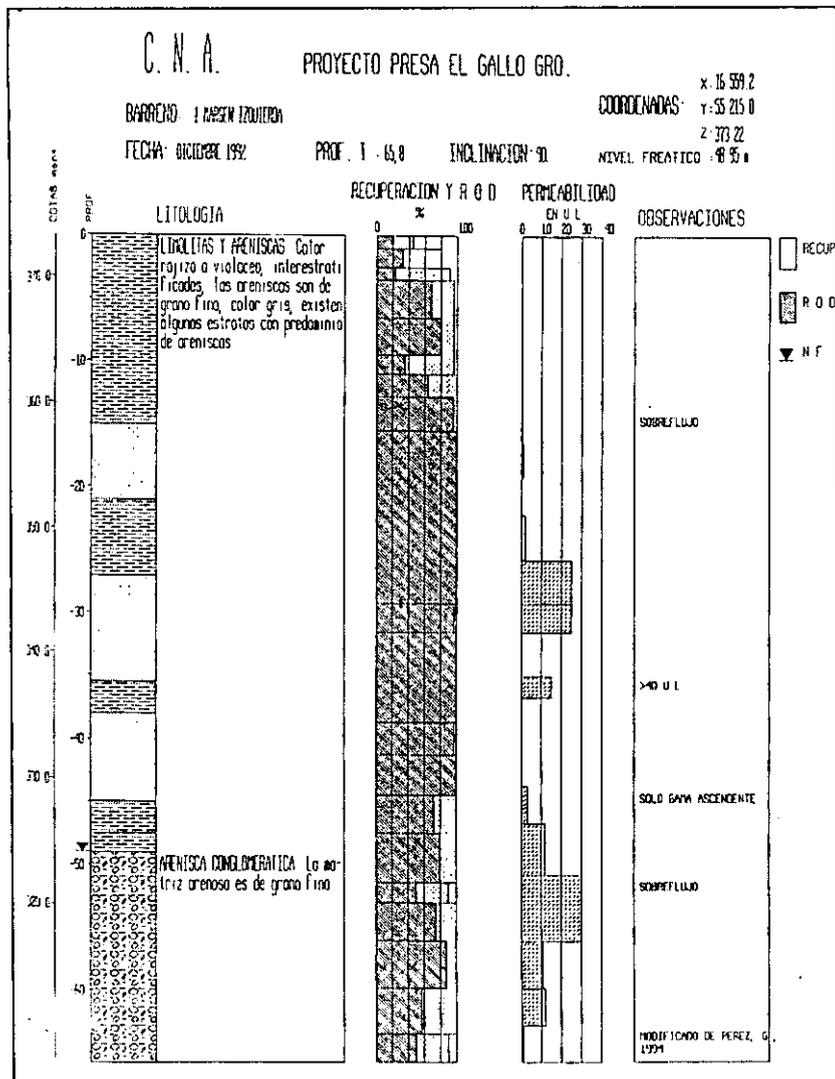
BARRENOS MARGEN DERECHA



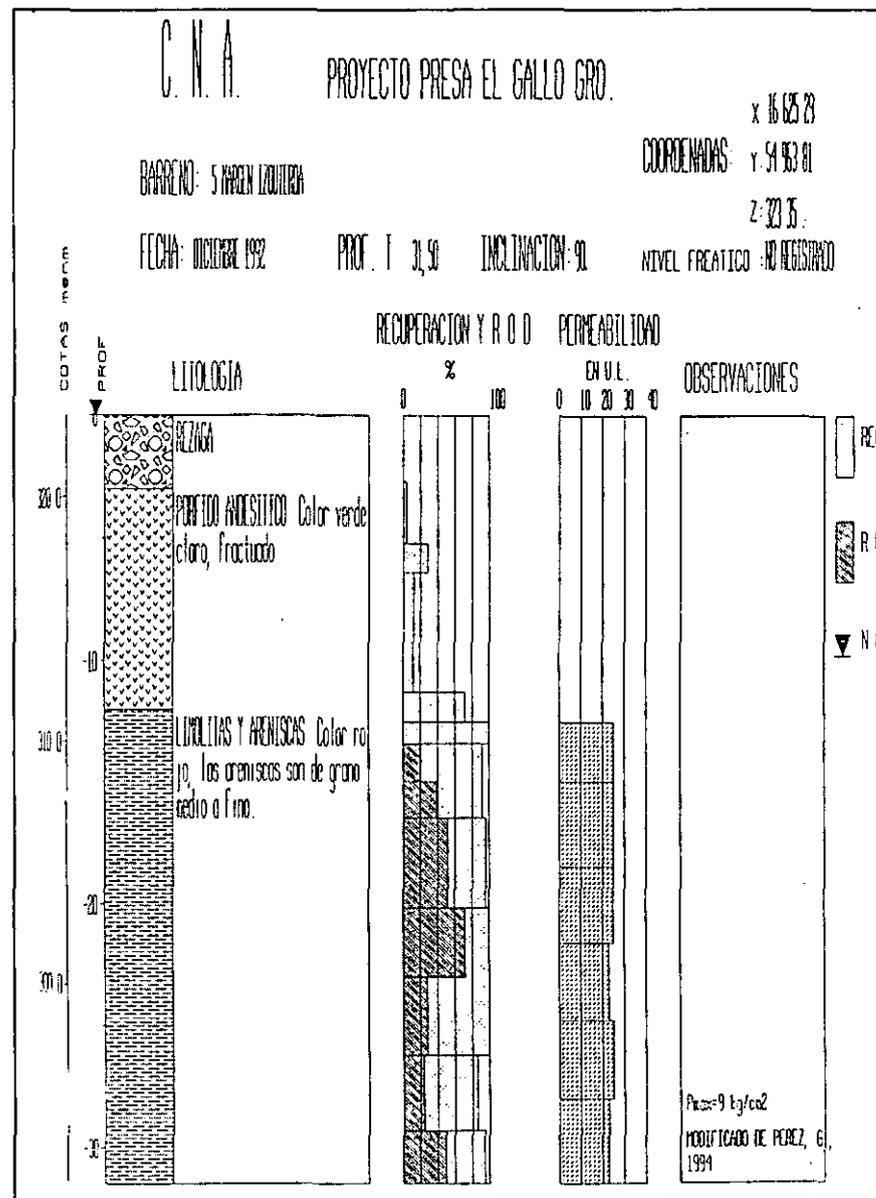
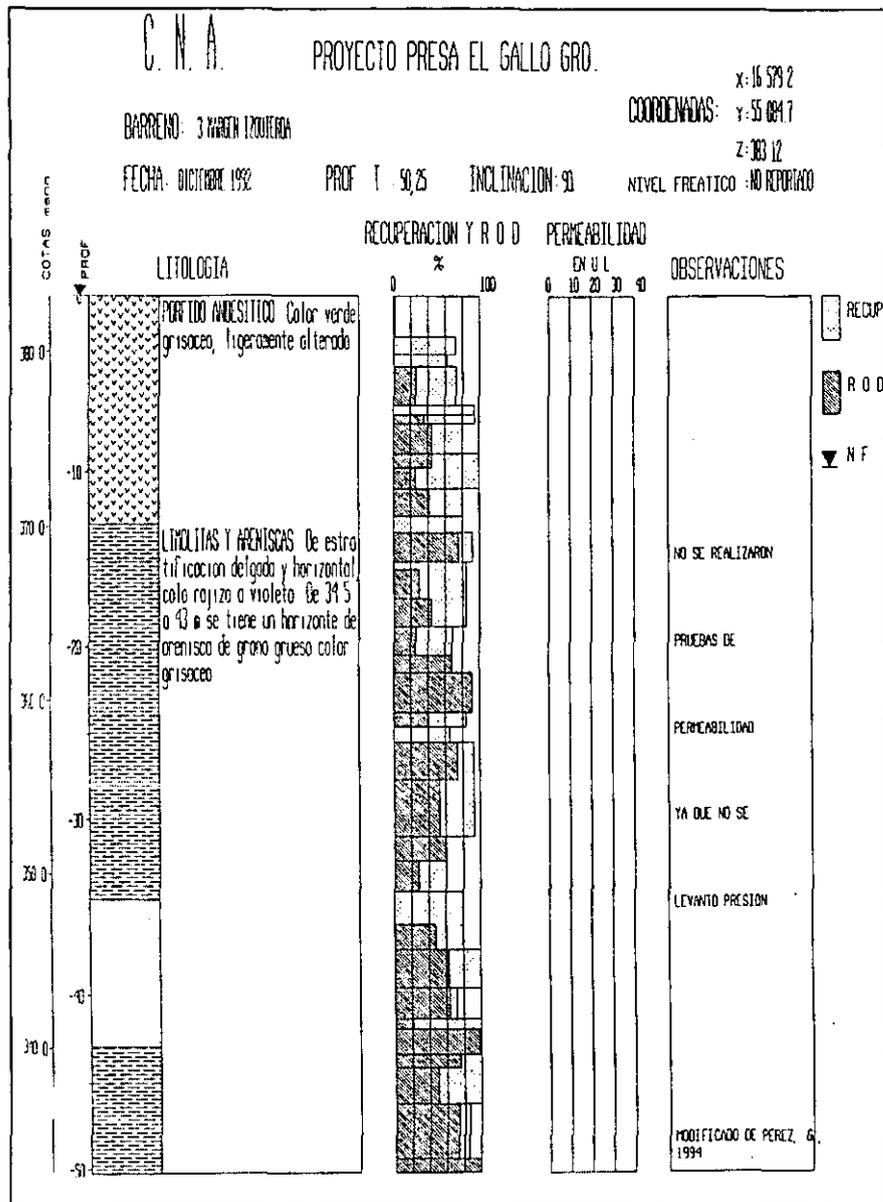
BARRENOS MARGEN DERECHA



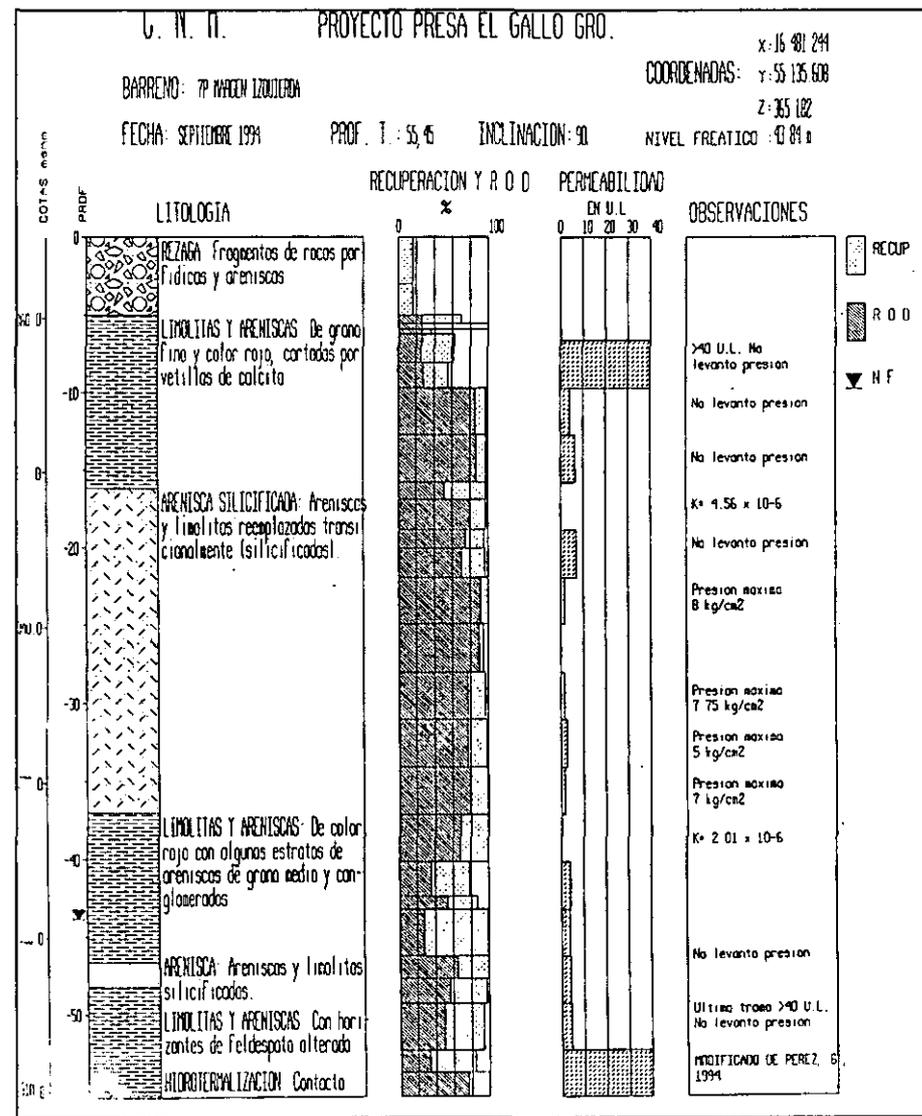
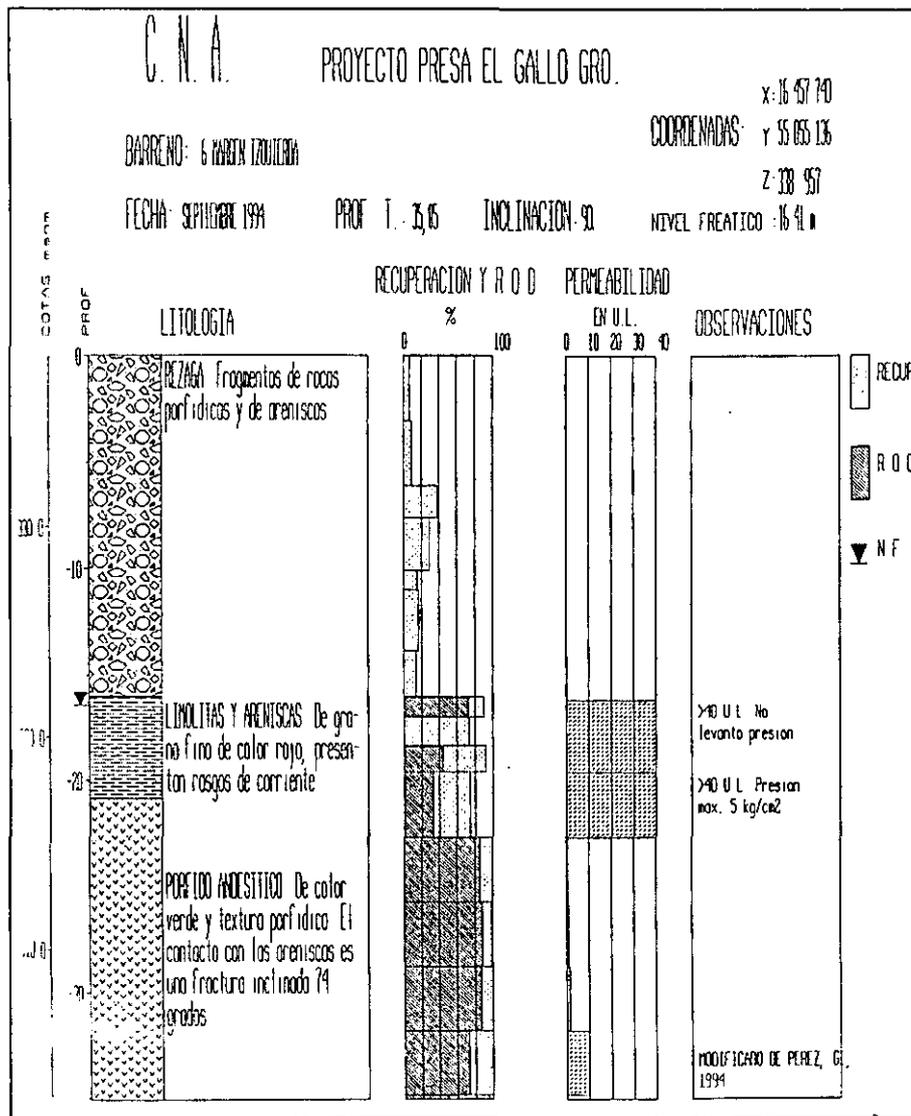
BARRENOS MARGEN DERECHA



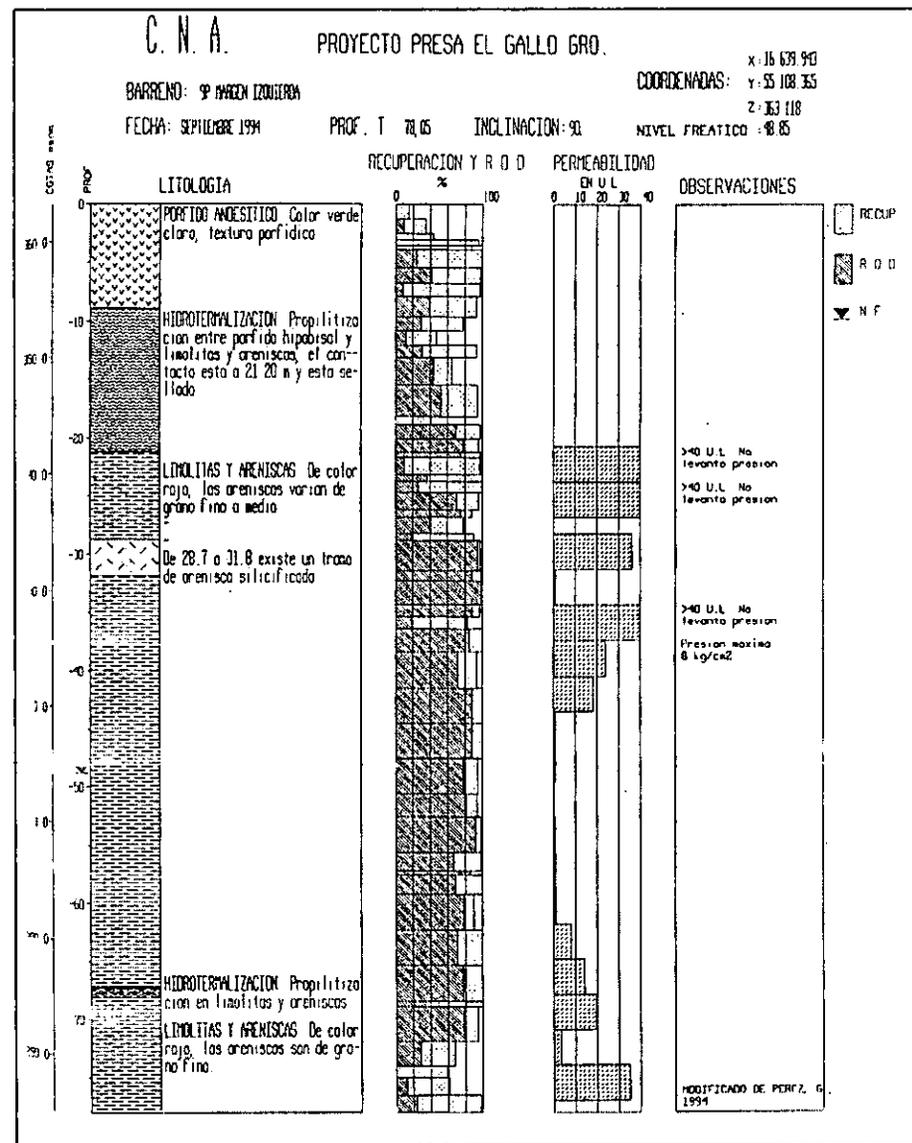
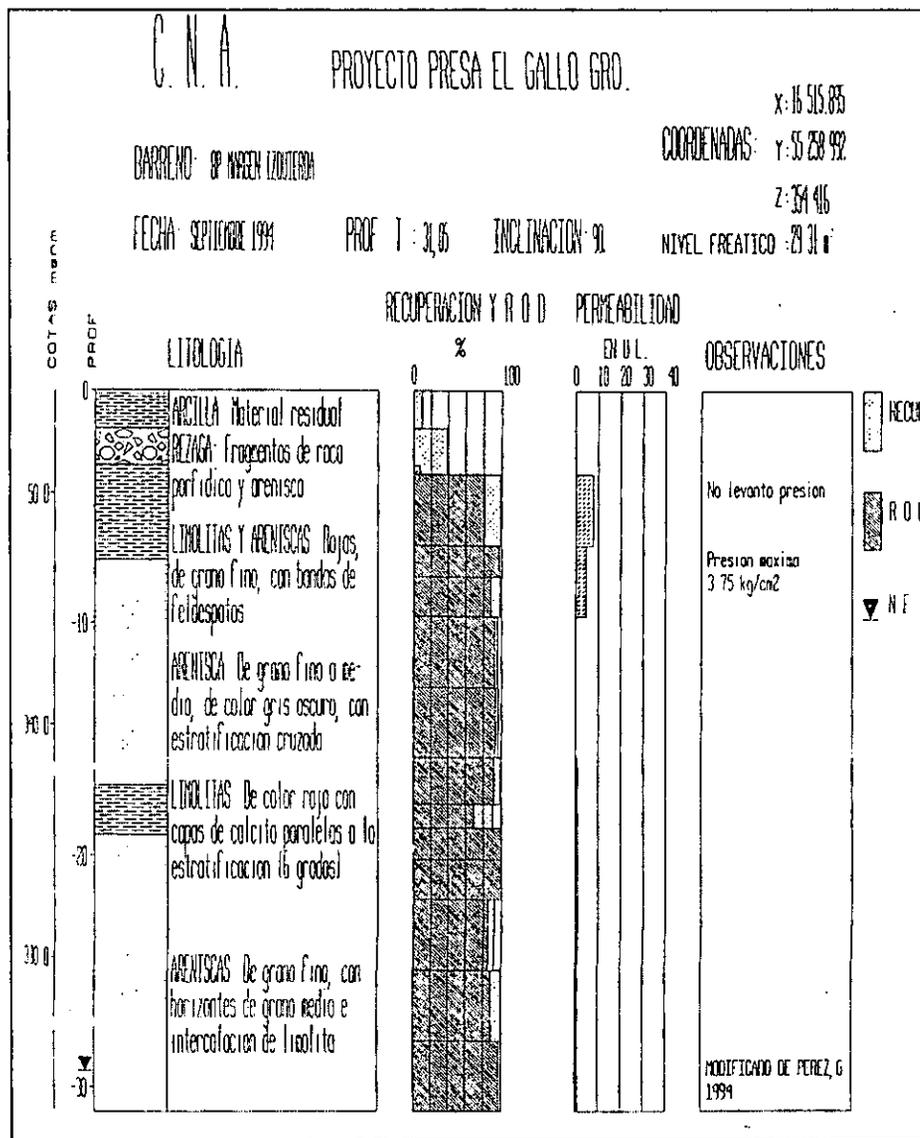
BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



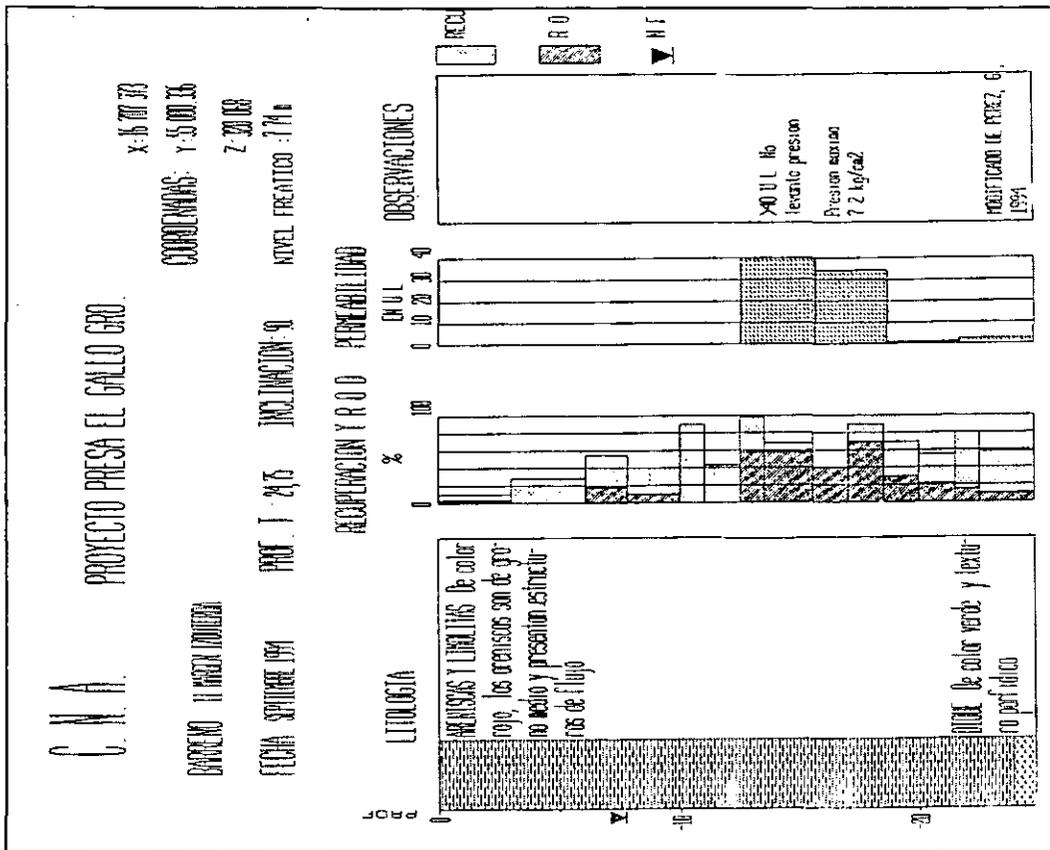
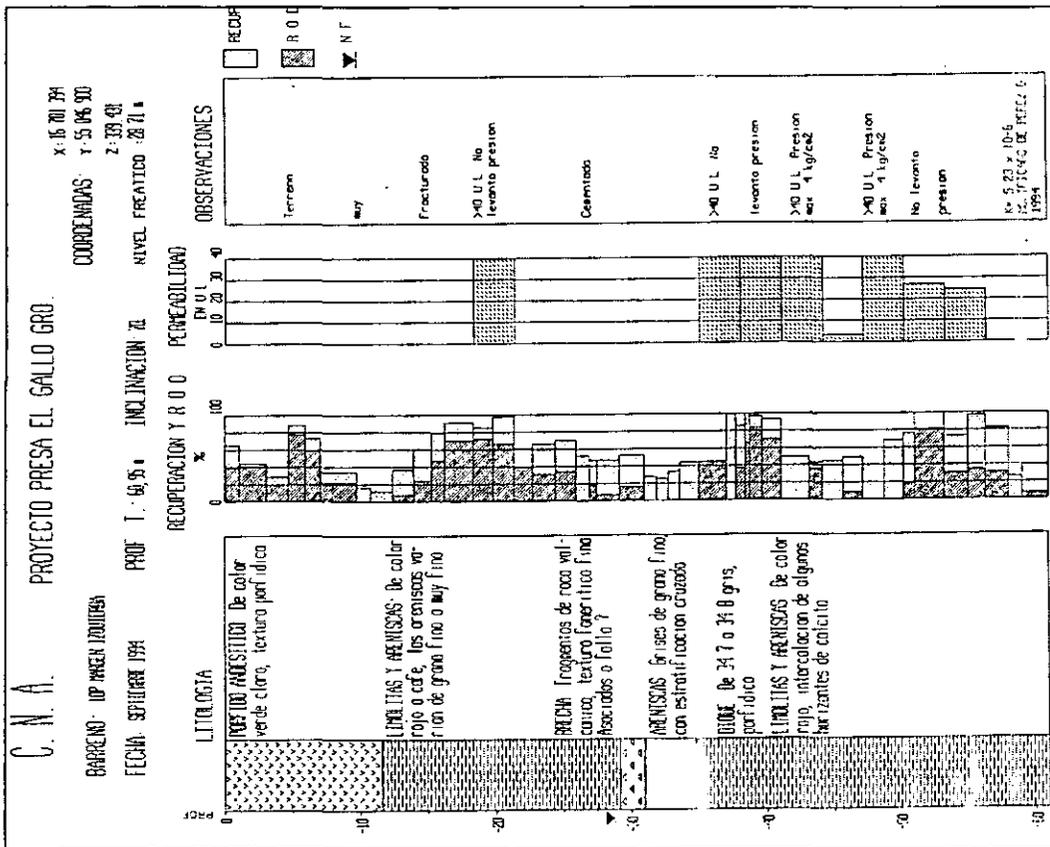
BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



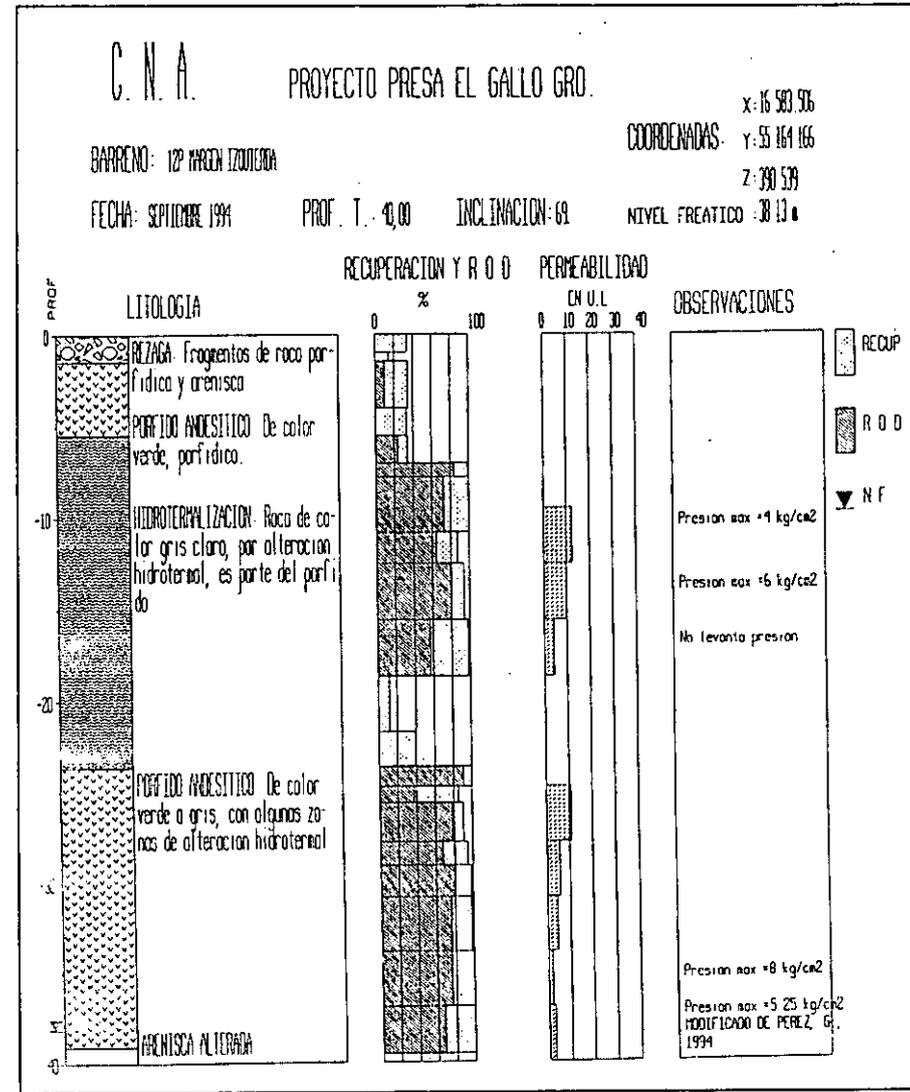
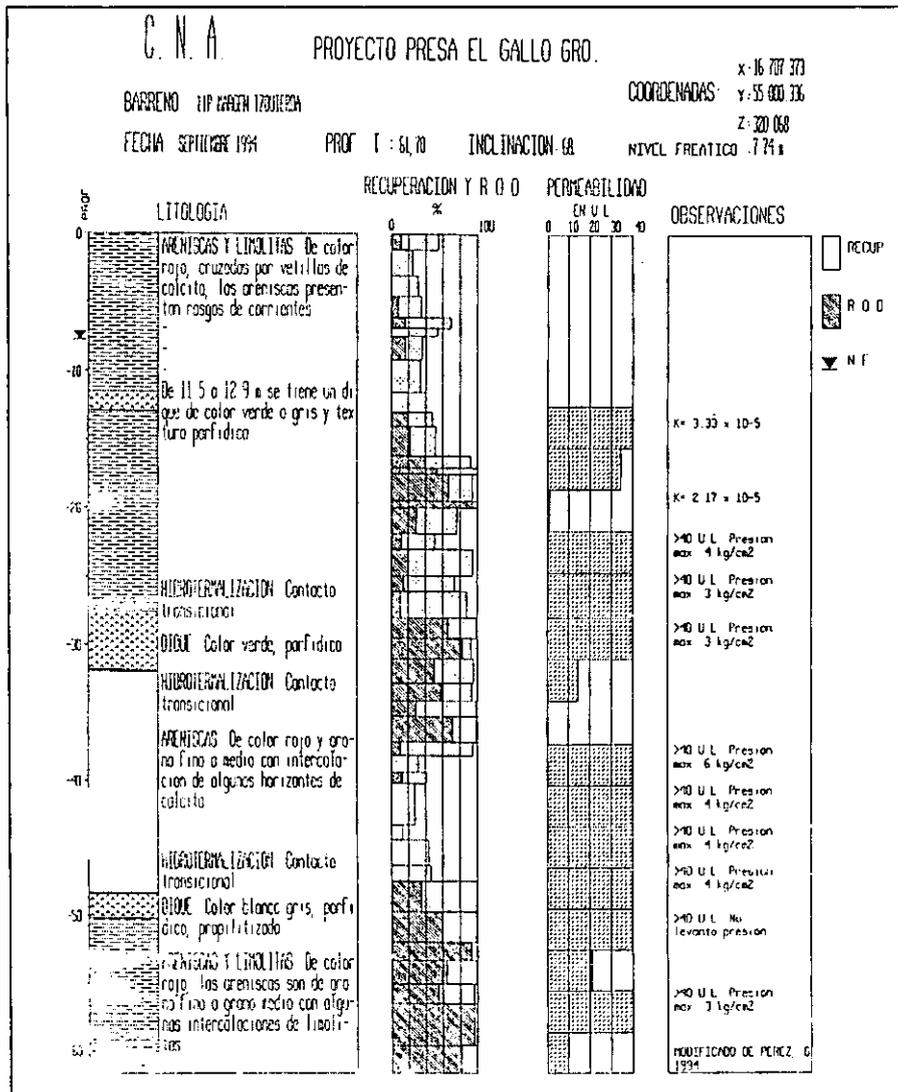
BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



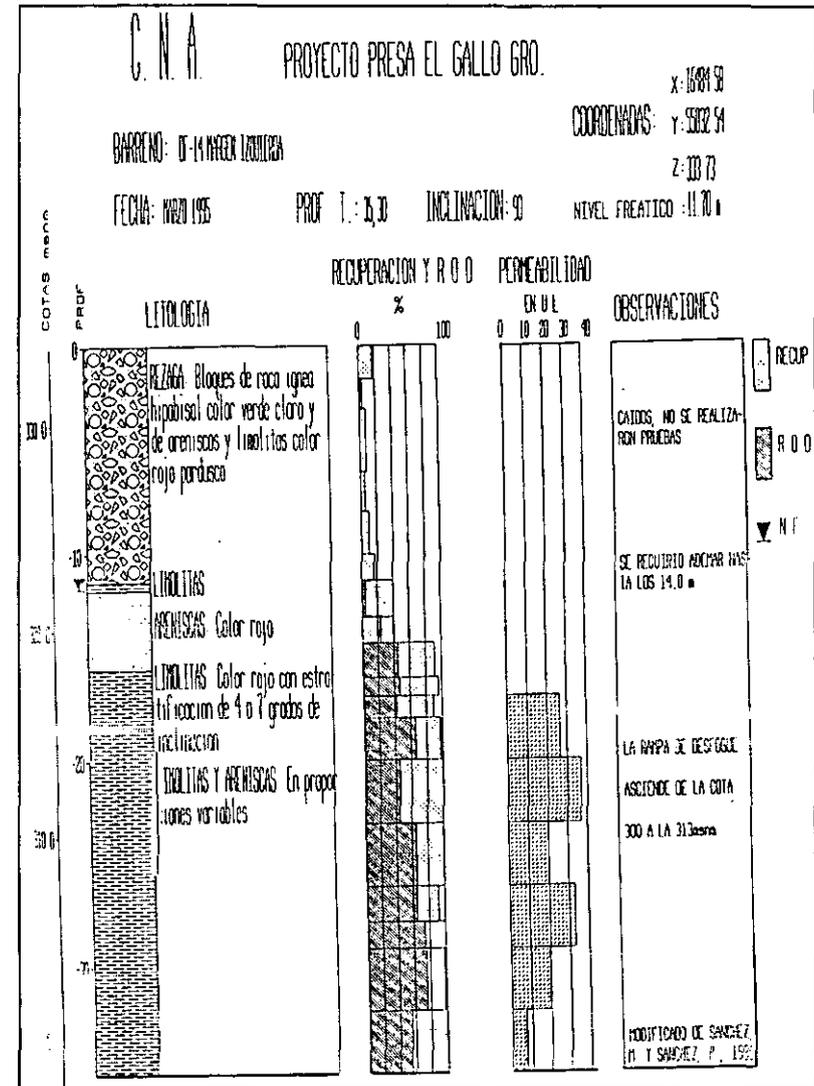
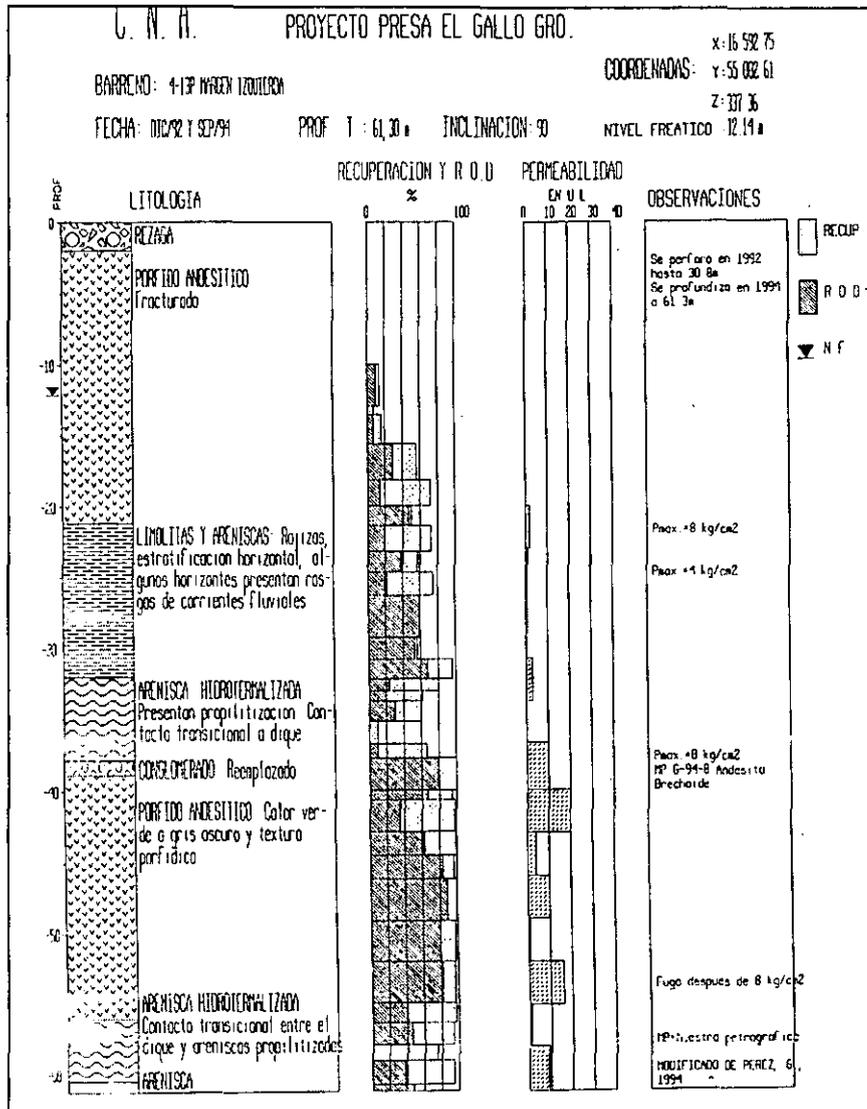
BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



BARRENOS MARGEN IZQUIERDA



BARRENOS MARGEN IZQUIERDA

C. N. A.

PROYECTO PRESA EL GALLO GRO.

BARRENO: TC-16 MARCEN ZOUTEZUA

COORDENADAS: X: 16533 82
Y: 55217 124

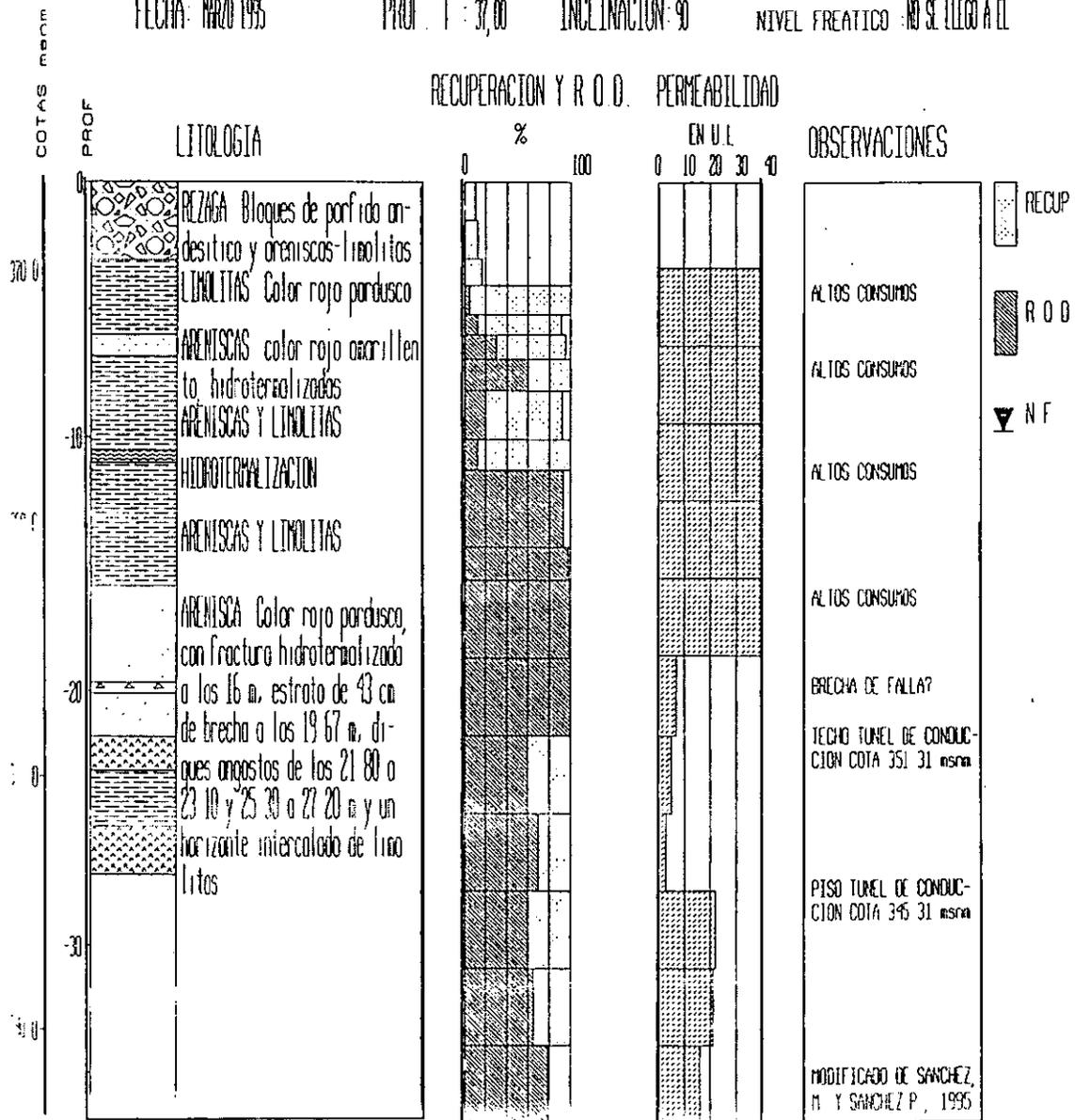
FECHA: MARZO 1995

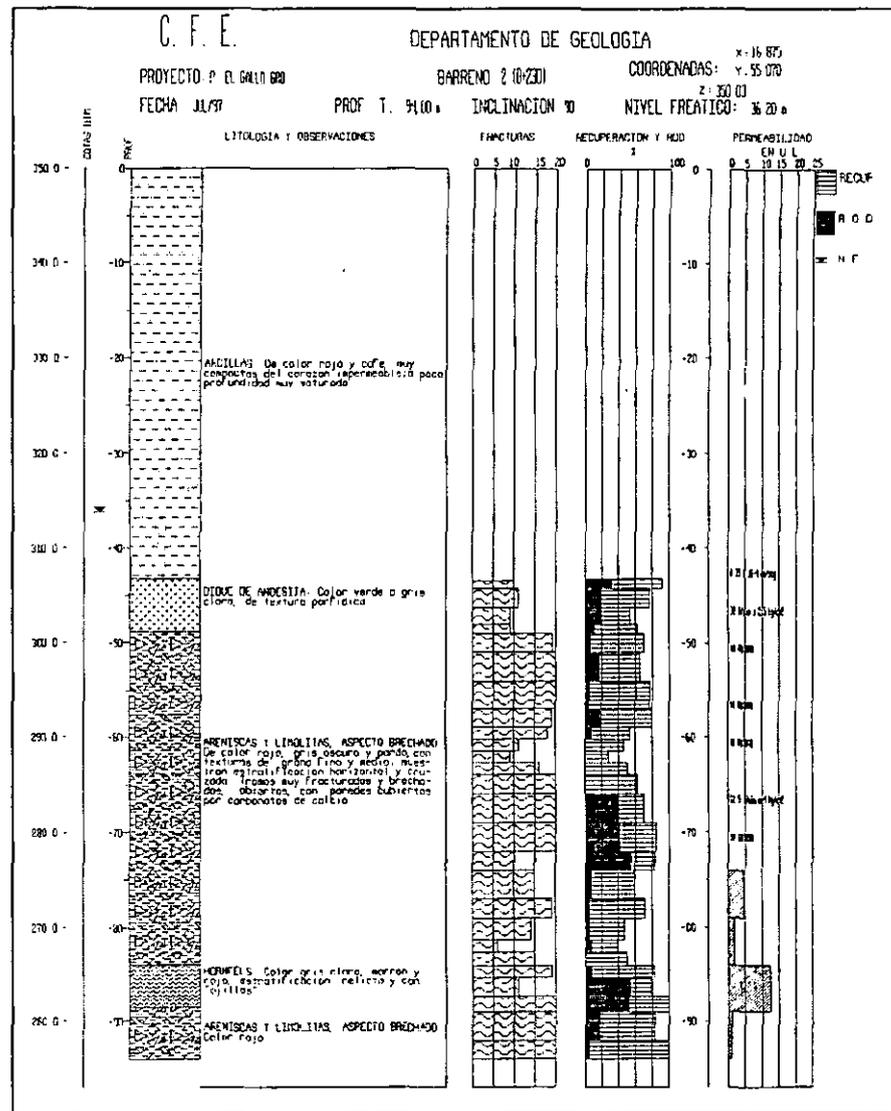
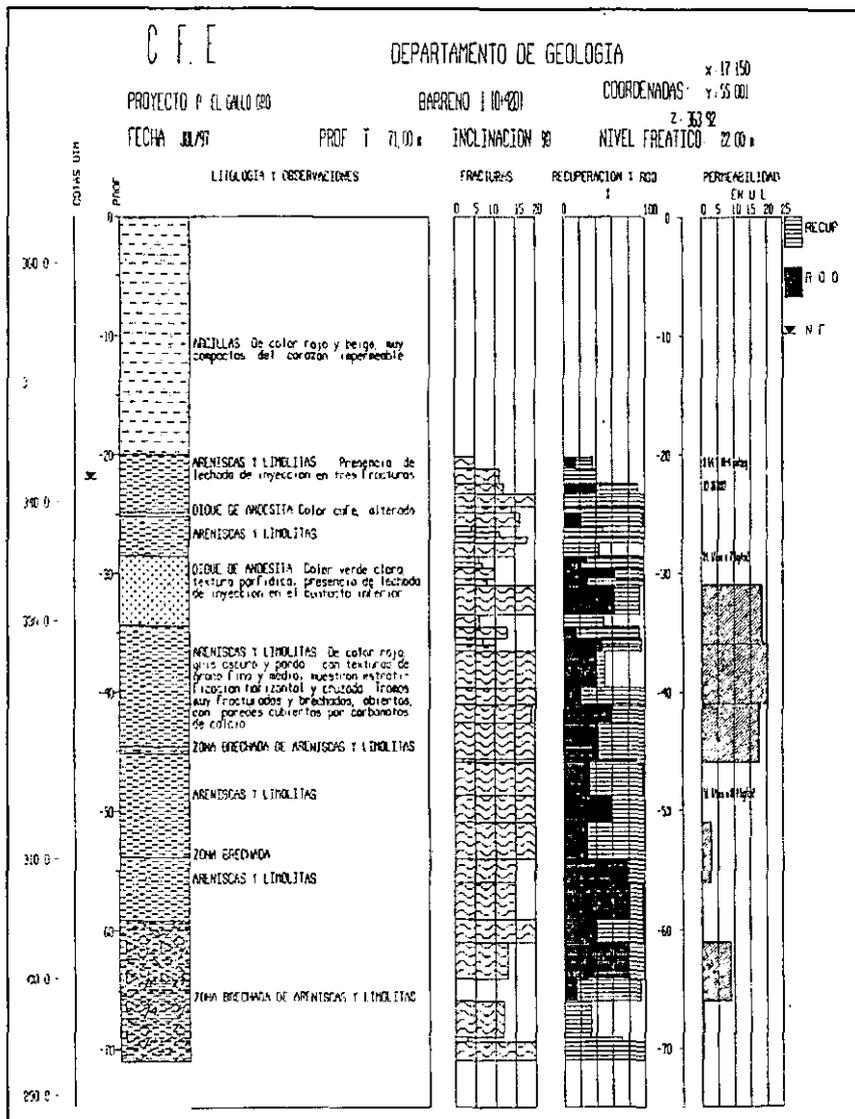
PROF. T: 37,00

INCLINACION: 90

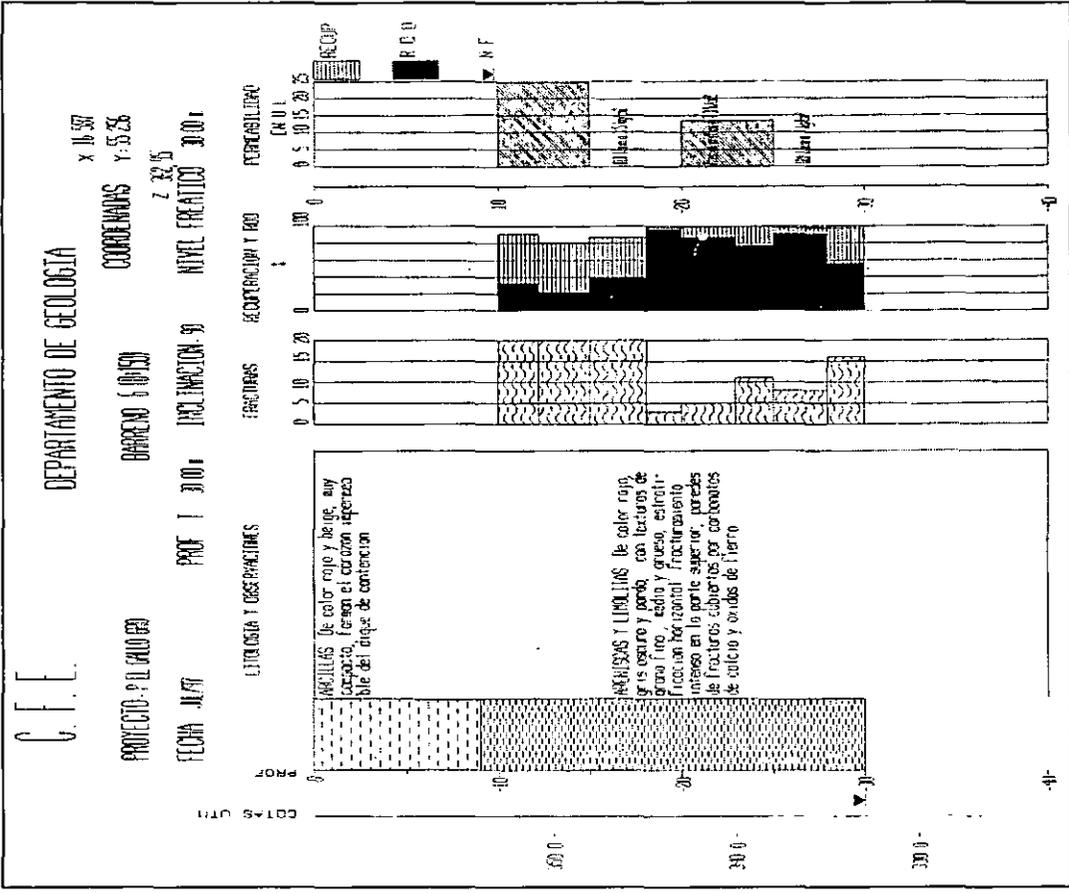
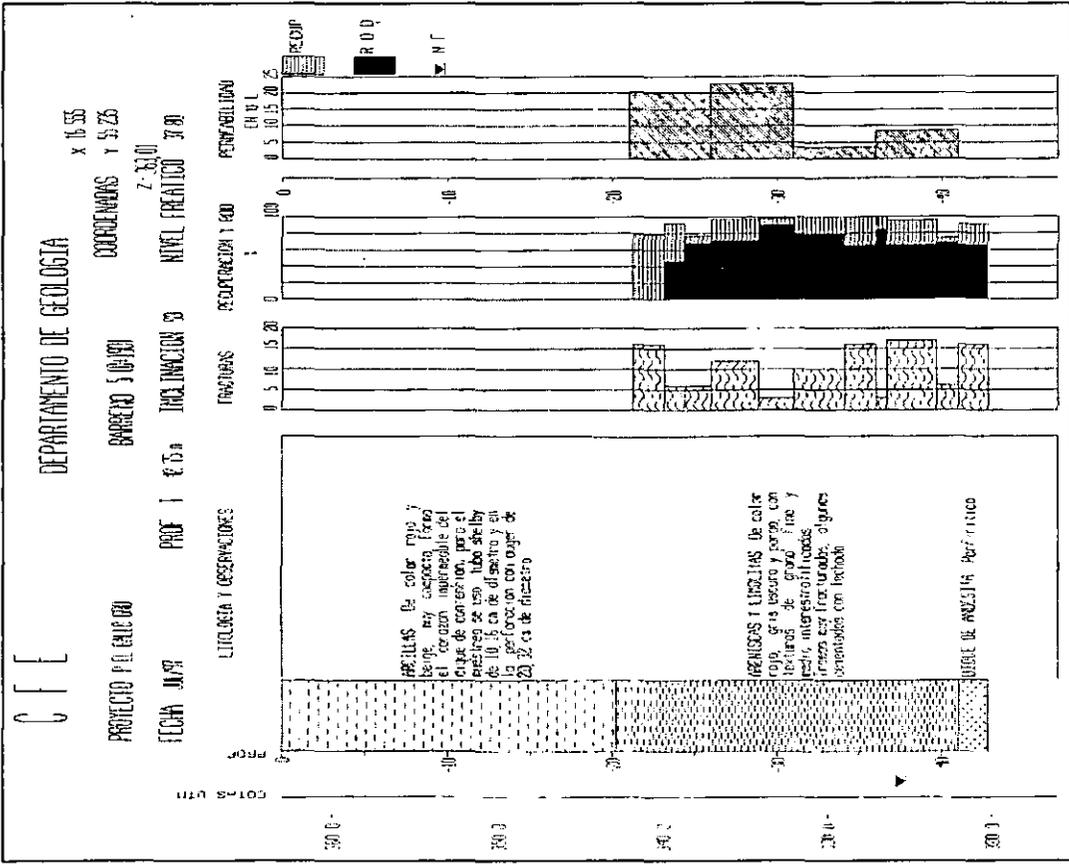
Z: 373 39

NIVEL FREATICO: NO SE LLEGO A EL

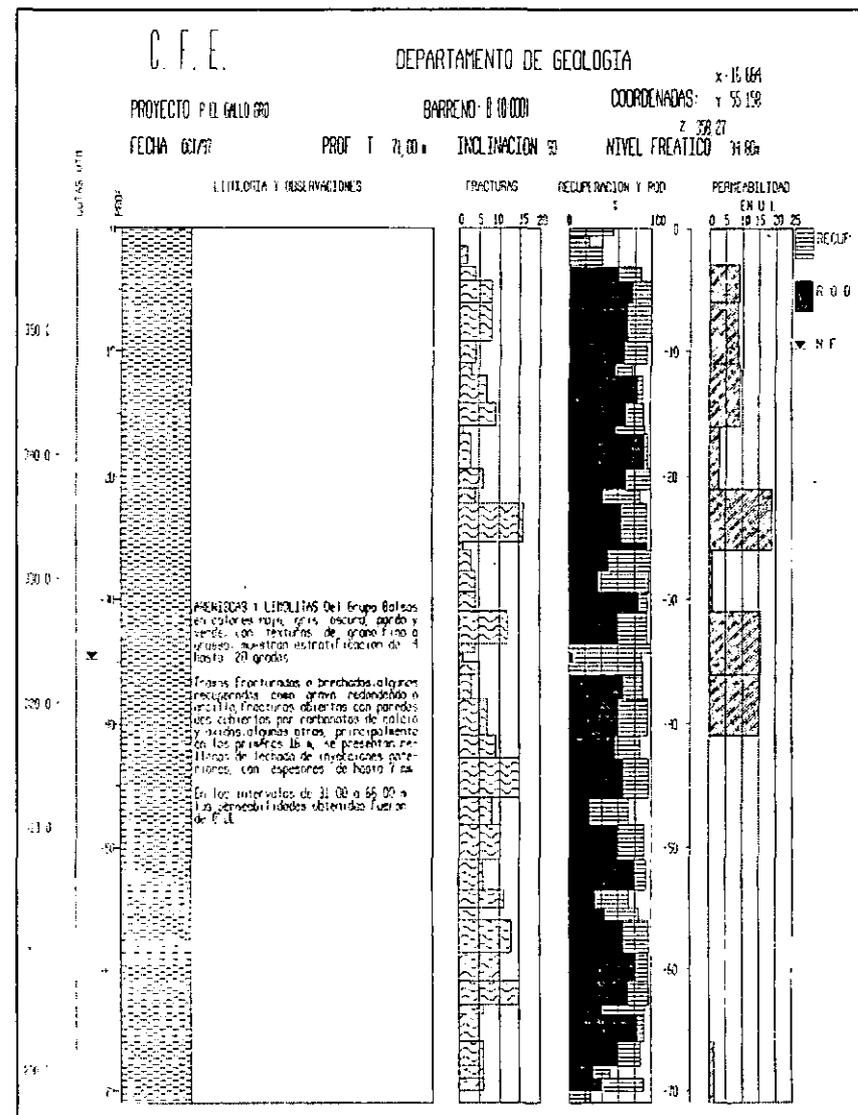
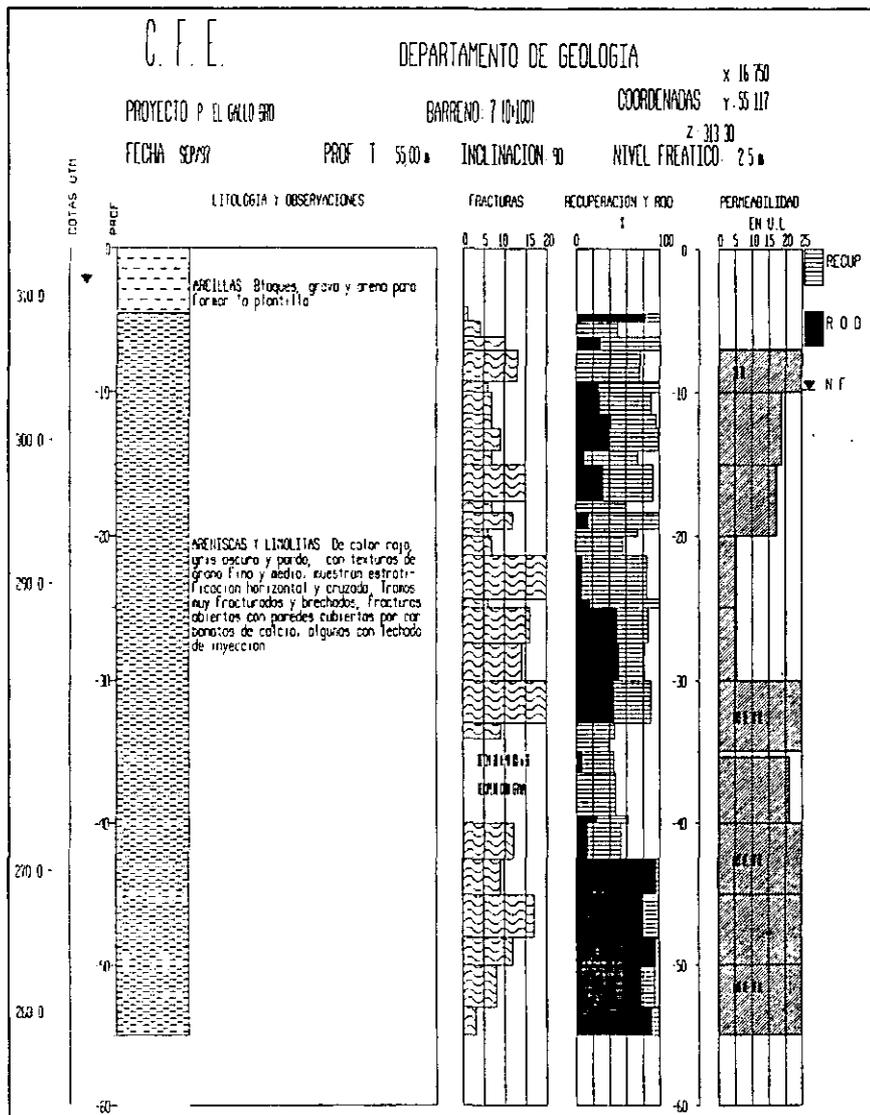




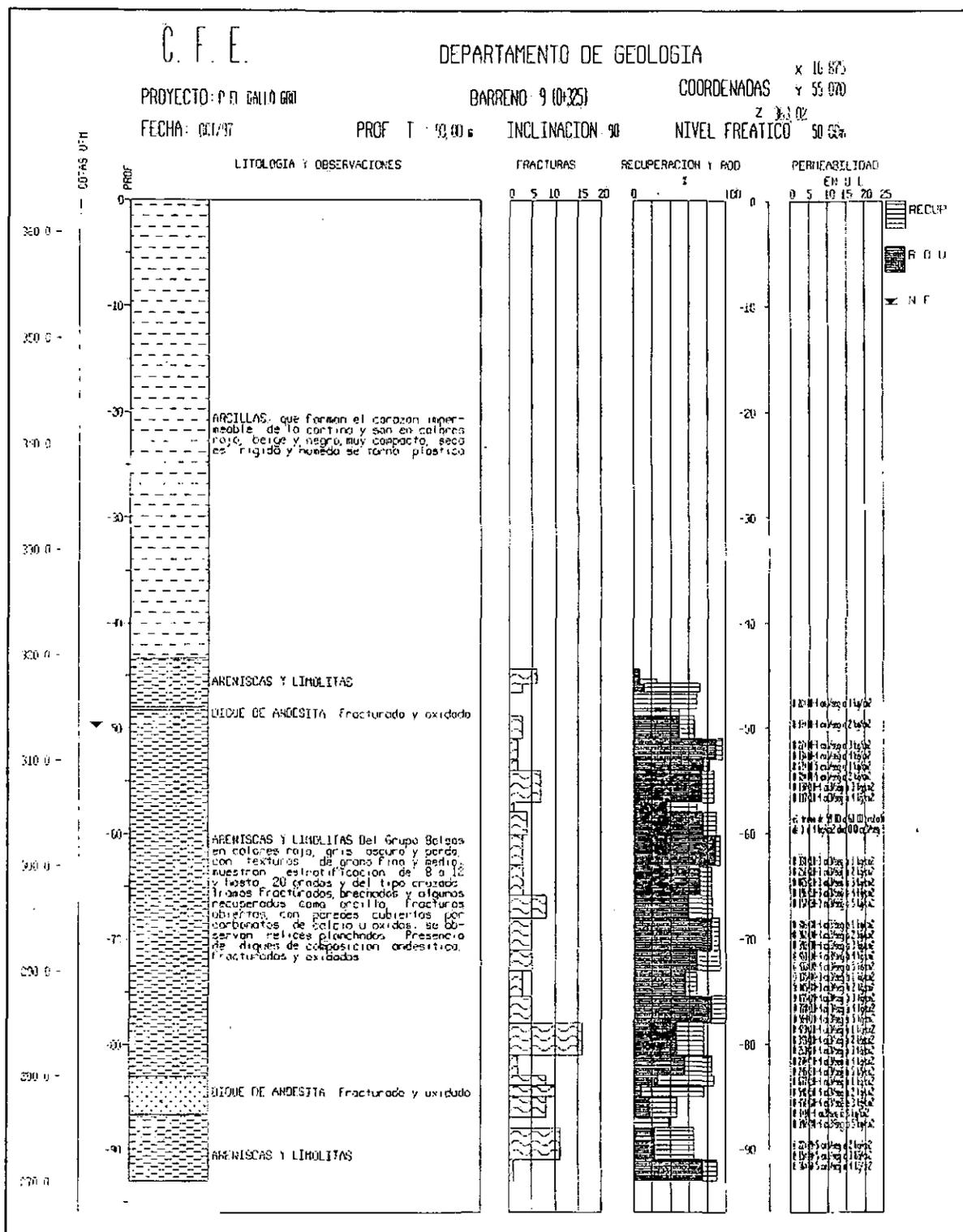
**BARRENOS DE EVALUACIÓN.
CAMPAÑA 1997**



**BARRENOS DE EVALUACIÓN
CAMPANA 1997**



BARRENOS DE EVALUACIÓN
CAMPAÑA 1997



**BARRENOS DE EVALUACIÓN
 CAMPAÑA 1997**

ANEXO III

**MEMORIA
FOTOGRAFICA**

PRESA "EL GALLO", GRO.

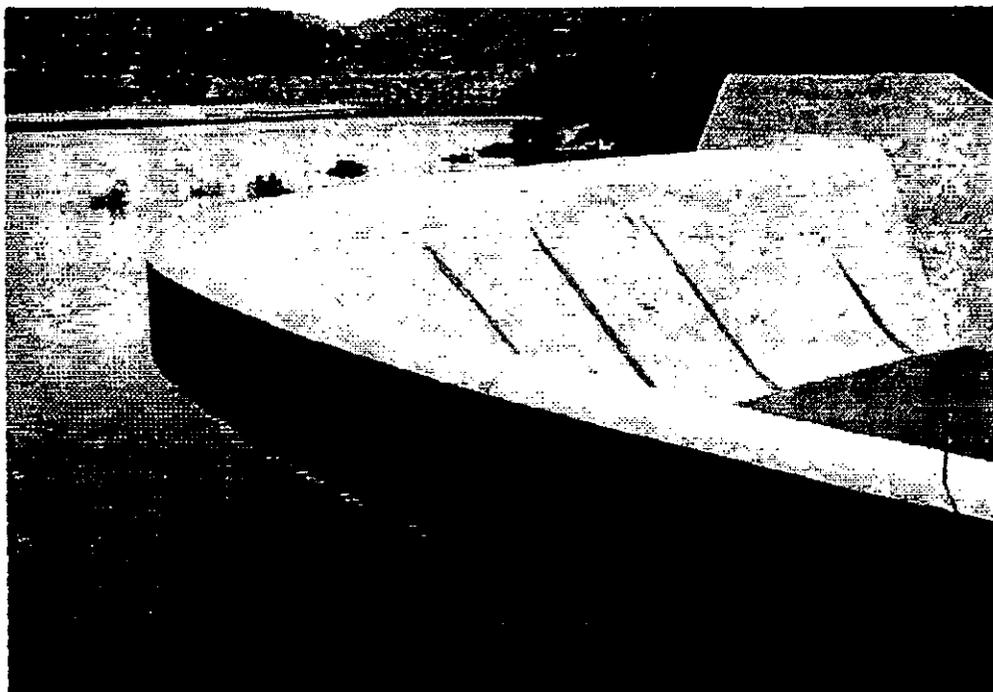


Foto 1. Vertedor de cresta libre con perfil tipo Creager.

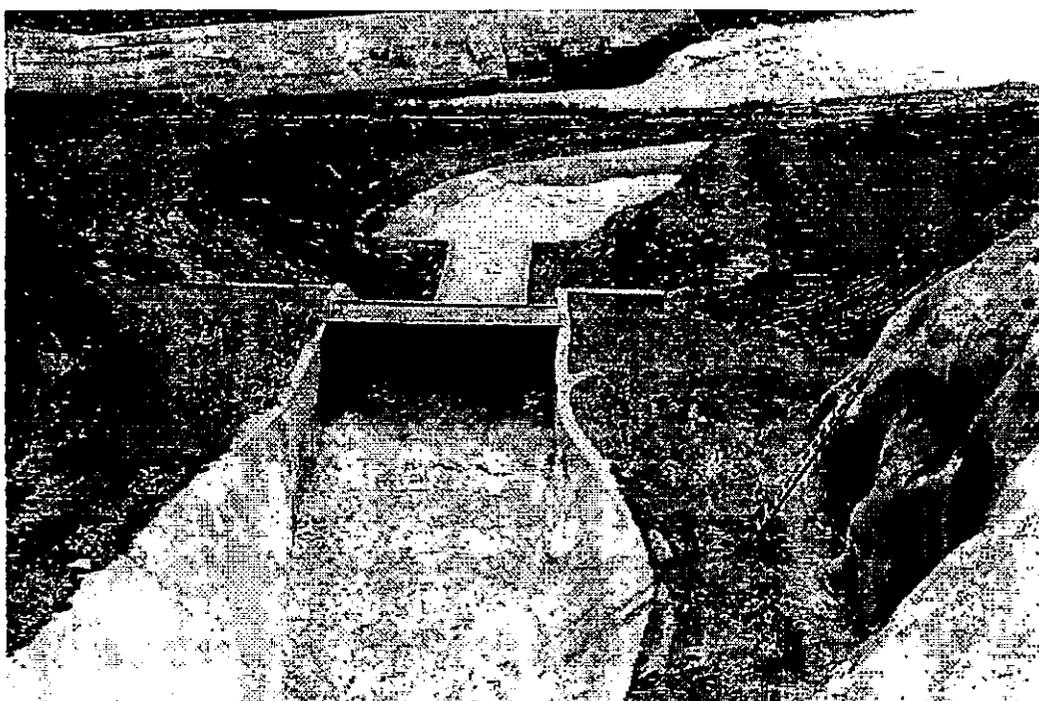


Foto 2. Compuertas de la obra de toma, margen derecha.

PRESA "EL GALLO", GRO.

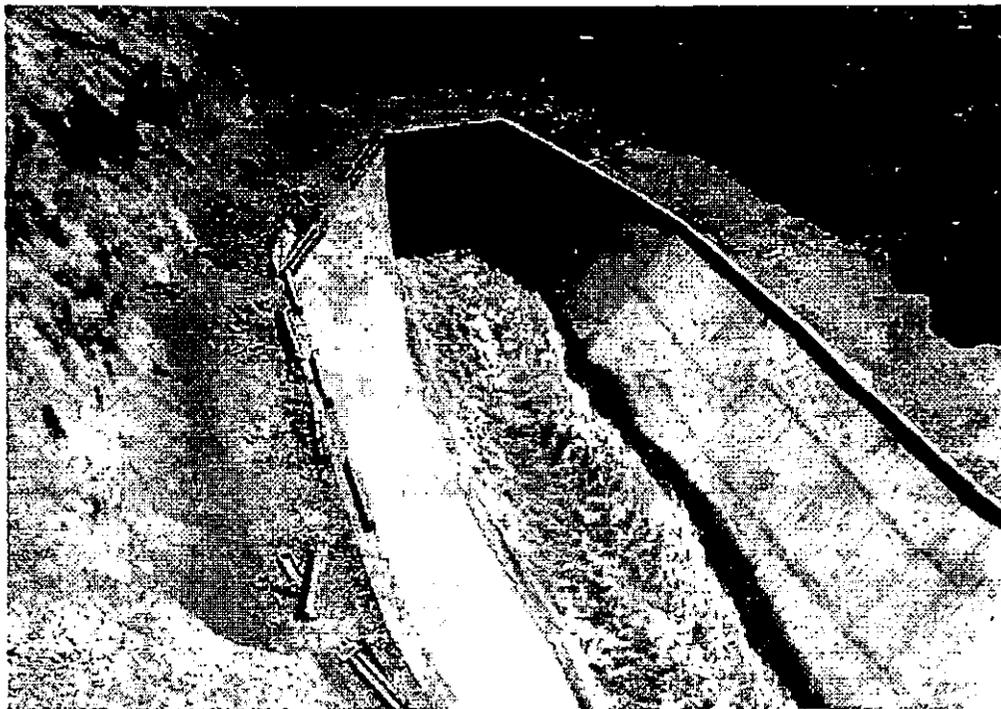


Foto 3. Túnel de la obra de toma.



Foto 4. Vista de la cortina en la margen derecha, antes de reiniciarse los trabajos en 1997.

PRESA "EL GALLO", GRO.



Foto 5. Formación Balsas, obsérvese el pequeño espesor de los estratos.



Foto 6. Cuerpo intrusivo hipabisal (Tm-a).

PRESA "EL GALLO", GRO.



Foto 7. Formación Balsas (Tb), cubierta concordantemente por el Pórfido andesítico (Tma) .

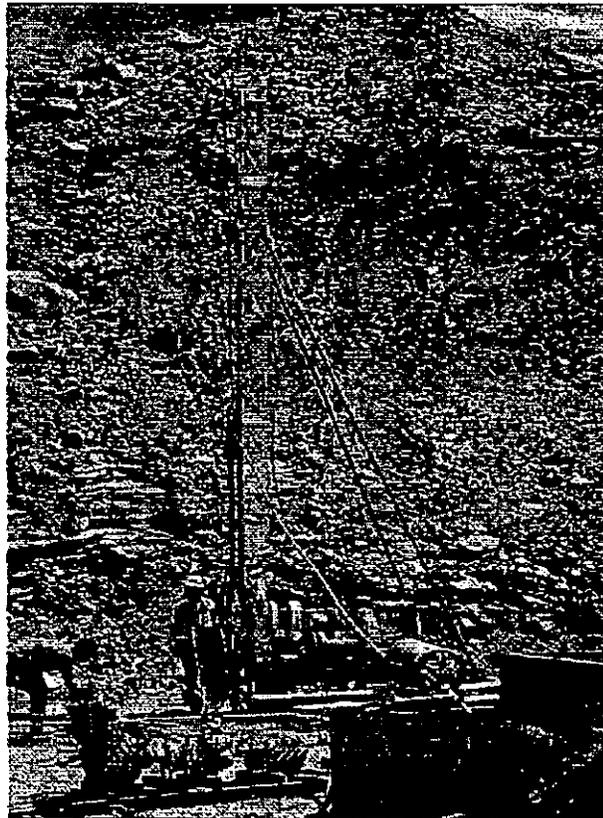


Foto 8. Perforación para prueba de permeabilidad estación 0+084.

PRESA "EL GALLO",GRO.

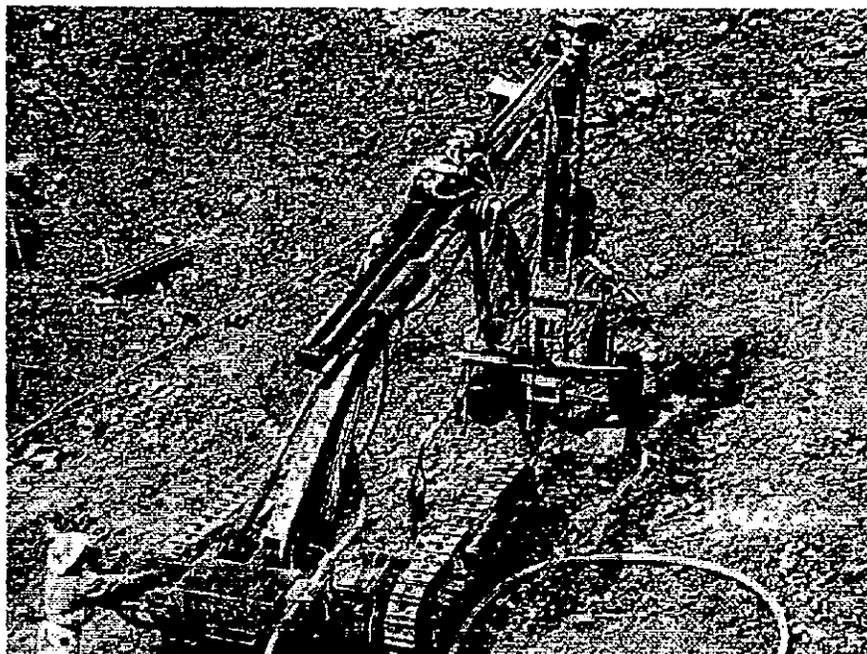


Foto. 9. Equipo de barrenación para inyectado en la ladera izquierda.

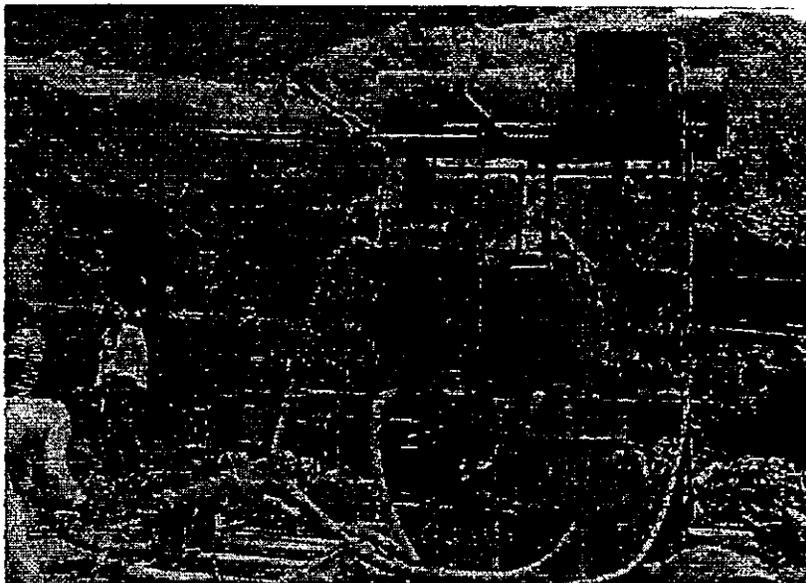


Foto 10. Equipo para dosificar mezclas de inyectado y bombeo (arriba. Tanques de reposo de bentonita hidratada, abajo: tanques mezcladores, agitadores y bombas moyno).



Foto 11. Tubería de inyectado y manómetro de control de presiones en un pozo de inyectado