

LAS MINAS DE CAPTACION DE AGUA EN EL MACIZO VOLCANICO DE FAMARA
(LANZAROTE, ISLAS CANARIAS)

Custodio, E.

ABSTRACT : The water abstraction mines in the Famara volcanic massif draft mainly on the water reserves contained in a low permeability formation. They are uncommon abstraction works, from which many observation data have been cumulated. The study of these data converts them in some kind of pilot works in massifs alike. The study of discharge and water chemistry yields a mean permeability less than 1 m/day and frequently less than 0,01 m/day, but the storage coefficient after a slow drainage may exceed 10 per cent, inclusive in tabular basalts of miocene age and until 600 metres below ground surface. The anisotropy is very important. The water is saline and its composition is a function of climate and reflects a very high underground residence time.

RESUME : Les mines de captation d'eau du massif volcanique de Famara, exploitent principalement des réserves d'eau emmagasinée dans un milieu de faible perméabilité. Il s'agit de travaux singuliers de captation, desquels on possède un nombre élevé de données qui les rendent de grand intérêt en tant que travaux pilotes pour l'étude du drainage et des travaux souterrains dans des massifs similaires. L'analyse détaillée de l'évolution des débits, et de la composition chimique des eaux permet de calculer que les perméabilités moyennes sont inférieures à 1 m/jour et fréquemment de l'ordre de 0,01 m/jour, mais avec une porosité à drainage lent qui peut être supérieure à 10 %, même en basaltes tabulaires datés comme d'âge miocénique et jusqu'à des profondeurs de 600 m au-dessous de la surface du sol. L'anisotropie est très grande. L'eau est notablement saline, montrant un clair effet climatique, en outre d'indiquer un temps élevé de séjour dans le terrain.

RESUME : Las minas de captación de agua en el macizo volcánico de Famara, explotan principalmente reservas de agua almacenada en un medio de escasa permeabilidad. Se trata de obras de captación singulares, de las que se posee un número elevado de datos que las hacen de gran interés como obras piloto para el estudio del drenaje y de obras subterráneas en macizos similares. El análisis detallado

Curso Internacional de Hidrología Subterránea y Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, Beethoven 15, 3°, Barcelona 21. España.
Universidad Politécnica de Barcelona. ETSIIB-LIN. Diagonal 647. Barcelona 17.

SIAMOS-78. Granada (España)

de la evolución de caudales, y de la composición química de las aguas permite calcular que las permeabilidades medias son inferiores a 1 m/día y con frecuencia del orden de 0,01 m/día, pero con una porosidad a drenaje lento que puede superar el 10 %, aún en basaltos tabulares datados como de edad miocénica y a profundidades de hasta 600 m bajo la superficie del terreno. La anisotropía es muy grande. El agua es notablemente salina, mostrando un claro efecto climático además de reflejar un elevado tiempo de residencia en el terreno.

BT 1

SIAMOS-78. Granada (Españo)

1. - INTRODUCCION

La isla de Lanzarote, con alrededor de 45 000 habitantes y 796 km^2 de superficie, es la más septentrional y oriental de las Islas Canarias, y dista solamente 125 km de la costa sahariana (fig. 1). Su forma es alargada, de NE a SW, y está separada de la vecina isla de Fuerteventura por solo 12 km de un mar poco profundo.

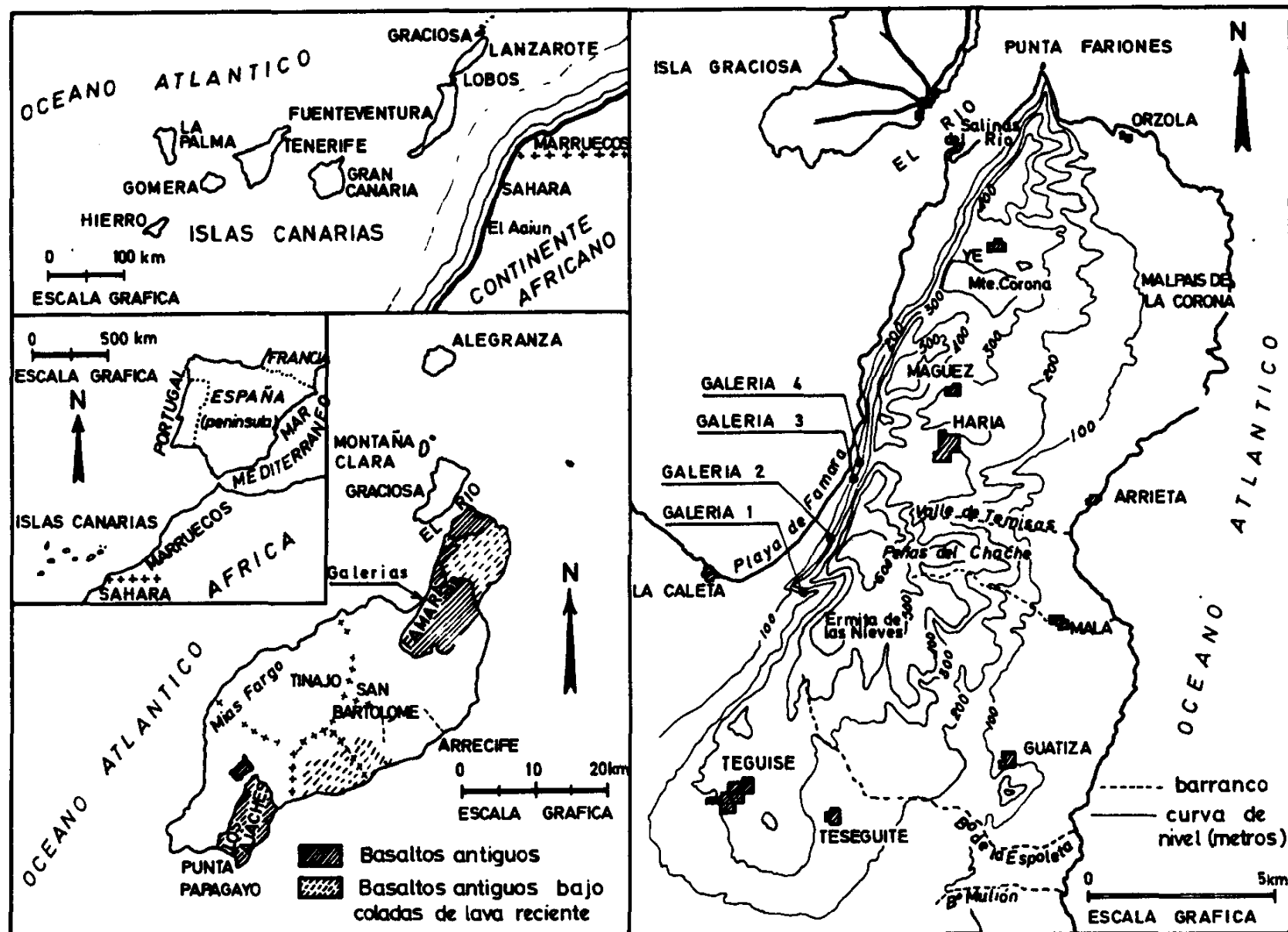
Toda la isla es volcánica, con importantes efusiones históricas, siendo las de 1724 unas de las más duraderas y voluminosas de las conocidas mundialmente.

El área más elevada es el macizo basáltico miocénico de Famara, en el norte, donde se alcanzan los 670 m de altitud a solo 2 km de la costa. El macizo de Famara, alargado de Norte a Sur, está formado por coladas de basalto tabulares. Acaba en un impresionante acantilado sobre el mar en el lado Oeste, y es algo más suave al Este, donde alcanza el mar a través de formaciones volcánicas más recientes, las cuales también cubren en algunas zonas deprimidas el interior del macizo.

Dicho macizo de Famara está disecado por profundos barrancos, en especial hacia el lado Este, que permanecen secos a lo largo del año y solo muy efimeramente conducen agua como consecuencia de tormentas importantes, en general de más de 50 a 60 mm en 24 h (en realidad en unas pocas horas).

Aunque el macizo de Famara es la zona más húmeda de la isla, no por ello pierde el caracter de aridez acentuada, ya que la pluviometría media en su cumbre, donde es mayor, es del orden de 180 mm/año y en la periferia es de solo 110 mm/año, e incluso de solo 80 mm/año en el límite llano del SE. Existen notables variaciones pluviométricas de un año a otro, entre 1/3 y 2 del valor medio. Se producen unos 40 días de lluvia al año, pero sólo unas pocas tienen alguna importancia, aunque en ocasiones pueden ser tormentas muy violentas (hasta 50 mm/hora).

La evaporación media del agua libre es de alrededor de 3000 m/año y la evapotranspiración potencial puede alcanzar 1500 mm/año.



SIAMOS-78. Granada (España)

Fig. 1.— Situación general y detalle del extremo norte de Lanzarote, con el macizo de Famara y situación de las galerías

2. - NATURALEZA DE LOS MATERIALES

Los basaltos del macizo de Famara, que son de caracter alcalino, corresponden a zonas inmediatas a grandes erupciones fisurales que se extendieron sobre una superficie mucho mayor que la actual, acompañándose de erupciones centrales simultáneas. Son frecuentes los cuerpos intrusivos tales como diques, sills y lacolitos, más frecuentes cuanto mayor es la profundidad.

La disposición de los basaltos tabulares muestra cierto grado de imbricación y alternan capas de lavas masivas de unos pocos metros de espesor por lo general, con escorias y acumulaciones de piroclastos, en un conjunto que regionalmente buza unos 5° hacia el ESE. Son relativamente frecuentes los niveles rojizos o almagres, de hasta 2 metros de espesor, en ocasiones con un grado de alteración notable, aunque su continuidad y homogeneidad es cuestionable a pesar de que se manifiestan claramente en largos trechos; no obstante pueden jugar un papel no despreciable en la existencia de pequeños niveles acuíferos colgados.

Los basaltos más modernos corresponden a emisiones centrales con conos que mantienen ciertas alineaciones preferenciales, y que en ocasiones están asociados a una notable acumulación de productos piroclásticos.

La zona preferente de emisiones se sitúa en el lado occidental y corresponde a fisuras de orientación aproximada N-S. Es probable una fisuración distensiva paralela asociada, así como fisuras de descompresión que llegan hasta el nivel freático en los valles más profundos del lado oriental (valle de Temisas). No existen evidencias de fallas.

La edad de los materiales influye en las características de permeabilidad propia de la roca, ya que cuanto más antigua sea mayor es el grado de alteración, de relleno de cavidades y de aparición de materiales poco permeables, si bien en ocasiones puede aumentar el grado de conexión entre poros. No obstante, al aumentar la edad puede aumentar la permeabilidad secundaria asociada a fisuras, en especial en zonas descomprimidas próximas a la superficie, aunque este efecto es menos acusado que el anterior.

En el macizo de Famara, los basaltos miocenos resultan poco permeables, pero la debil permeabilidad se mantiene a profundidades de

más de 500 m bajo la superficie del terreno. Los diques no suponen ningún obstáculo importante al movimiento del agua, e incluso en ocasiones son más permeables que la roca encajante. En general aumentan solo la anisotropía, principalmente en función de la fisuración vertical asociada (Custodio, 1978).

3. - RECARGA Y DESCARGA

La aridez climática hace que la recarga media anual sea muy pequeña o nula, tanto menor cuanto más retentivo sea el escaso suelo existente. Donde la roca aflora y está visiblemente fracturada es más probable la recarga del agua de lluvia y quizás de la condensación nocturna (aunque su contribución parece despreciable), ya que el agua infiltrada alcanza con cierta facilidad profundidades desde las que ya no es devuelta a la atmósfera. Esta recarga media anual, según datos basados en el balance diario del agua en el suelo y en el balance de ión cloruro entre el contenido en la lluvia y el contenido en el agua freática, puede llegar a 10 mm/año en zonas elevadas, y desciende hasta menos de 3 mm/año, e incluso cero en las áreas marginales.

Entre el nivel del mar y cota 500 m aparecen manantiales y rezumes permanentes, pero de caudal insignificante, con un aporte total máximo de 1 a 2 m³/día (~ 0,1 mm/año).

En el entorno de la ciudad de Haria, existen más de 100 pozos someros excavados en un recubrimiento de toba volcánica moderna. La extracción total no rebasa los 20 m³/día (menos de 1 mm/año en el área de recarga probable). Extracciones del orden de 50 m³/día, en parte agua salada marina, existen en el área de La Caleta, ya marginal al macizo de Famara, en el SW.

Las fuentes más importantes de agua subterránea son la galería de Famara (Fig. 1), en especial las cuatro construidas por el Cabildo Insular de Lanzarote para el abastecimiento a la capital, Arrecife, con la asesoría y colaboración del Servicio Geológico de Obras Públicas. Estas galerías son el objeto principal de esta comunicación.

En el conjunto del macizo se estiman unas reservas del orden de 250 hm³ por encima de la cota +25m, de las que en 1973 las galerías solo habían extraído menos del 1 %, si bien la extracción de una

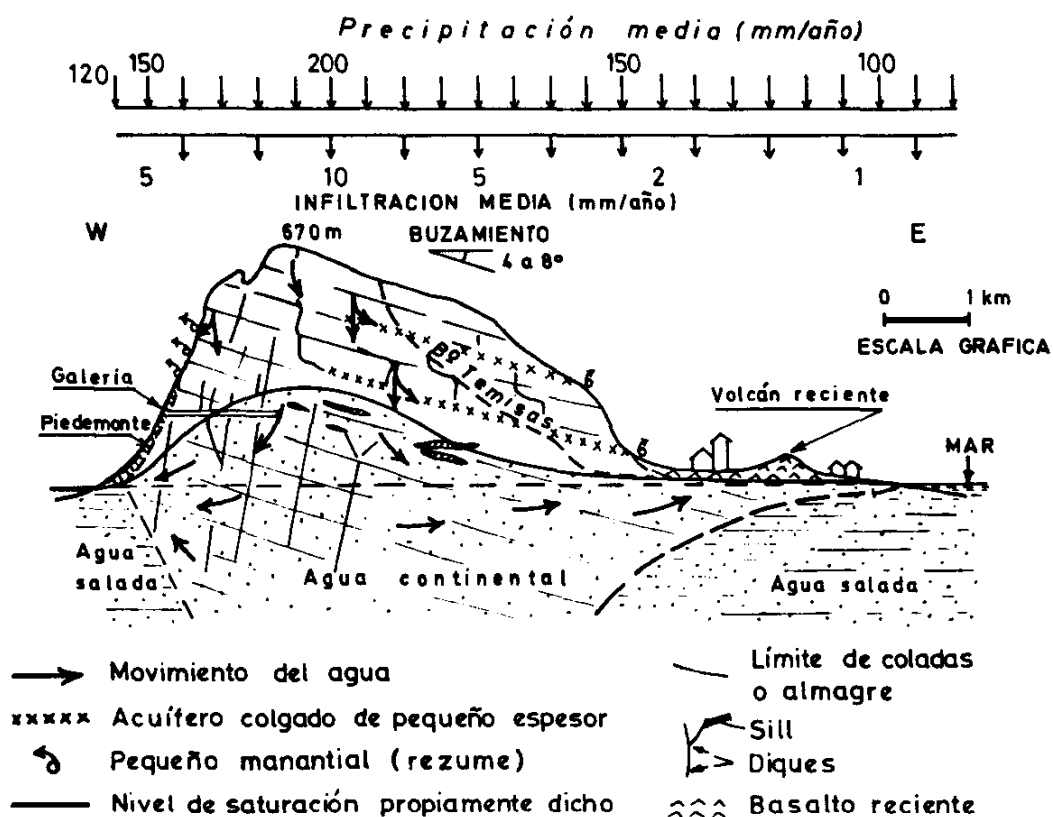
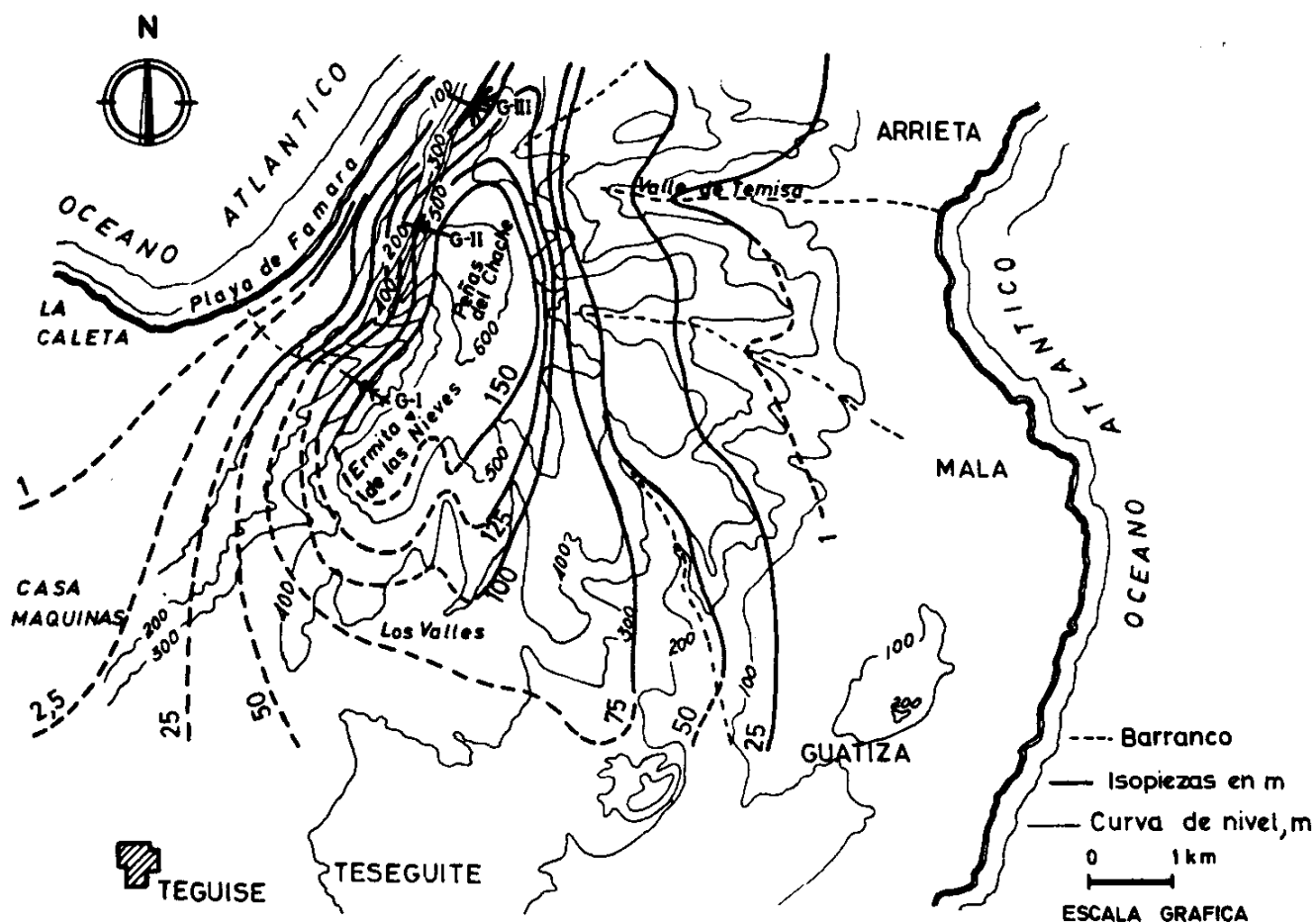


Fig. 2.— Superficie freática y sección simplificada

SIAMOS-78. Granada (Español)

parte importante de las mismas, dada la escasa movilidad del agua, requeriría numerosas nuevas obras de captación. En 1972 la producción de las galerías era de $900 \text{ m}^3/\text{día}$, en su mayor parte procedente de las reservas, pero después ha declinado hasta menos de $200 \text{ m}^3/\text{d}$.

4. - EXISTENCIA DE UN NIVEL DE SATURACION

Aunque en varias ocasiones se ha cuestionado la existencia de un nivel de saturación, la relativamente importante información piezométrica existente en el macizo de Famara en los sondeos y galerías permite dibujar una superficie freática (fig. 2) bien definida, con niveles estables, si bien los gradientes piezométricos son muy elevados (hasta 0,13) a pesar de la escasa recarga, dada la pequeñísima transmisividad en dirección al mar. Debido a la existencia de componentes verticales del flujo, los niveles piezométricos varían con la profundidad (fig. 3), pero ello no se contradice con la existencia del nivel de saturación profundo, sino que lo confirma.

De hecho la superficie freática debe considerarse virtual en zonas en que coincide con roca impermeable, pero con perforaciones apropiadas puede demostrarse su existencia. Ello no excluye la existencia de pequeños niveles colgados, de pequeña importancia (fig. 2).

La continuidad y regularidad aún a pequeña escala, de la superficie de saturación, queda demostrada por un estudio piezométrico con perforaciones realizado a lo largo de la galería III de Famara (fig. 6), a pesar de que esta galería tiene extensos tramos no productivos e intersecta varios diques, almagres, capas de basalto masivo, capas escoriáceas, etc. La normal respuesta de las propias galerías y de los sondeos de drenaje en ellas practicados, a las pruebas hidráulicas que serán comentadas más adelante, es una prueba más.

5. - CARACTERISTICAS DE LAS GALERIAS DE FAMARA

Las primeras obras de captación en galerías en Famara construidas en la década de 1950, sirvieron para recoger las aguas de algunos rezumes de escaso caudal, en general colgados sobre el nivel freático regional.

Tras un estudio de reconocimiento general y de perforaciones realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas, el Cabildo Insular de Lanzarote inició la construcción de galerías profundamente

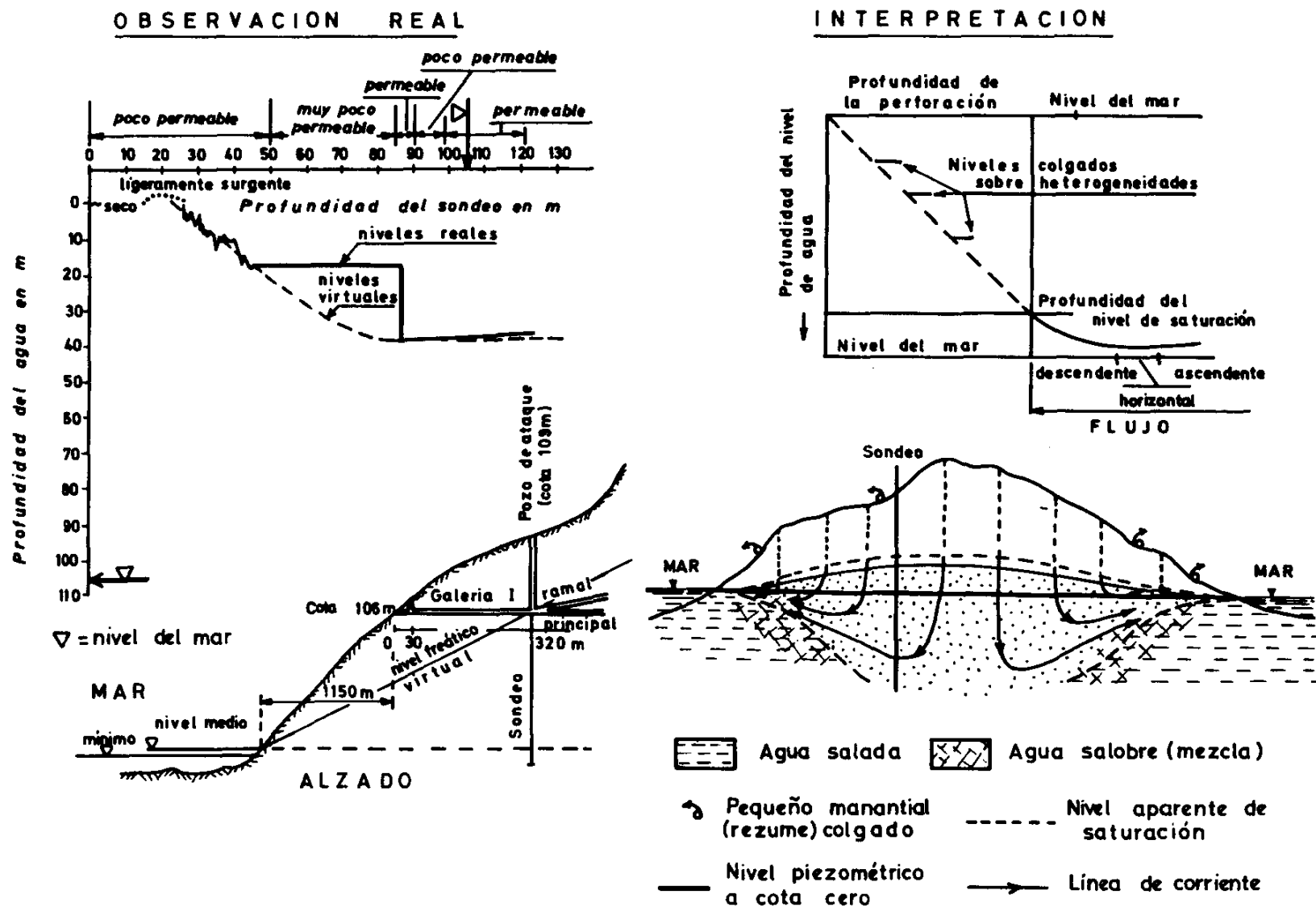


Fig. 3.— Evolución del nivel en sondeos, real e interpretada, en el Macizo de Famara, cuando los gradientes piezométricos son muy grandes

SIAMOS-78. Granada (España)

penetrantes, hasta alcanzar el nivel de saturación regional. En las galerías III y IV, el mencionado Servicio Geológico ha realizado sondeos y estudios de detalle para aumentar y mejorar las características de producción, así como para orientar las nuevas obras a realizar.

Las galerías I y II se emboquillaron a altura relativamente elevada para evitar la perforación del piedemonte poco estable adosado al farallón de Famara. La III se emboquilló a menor cota en un barranco, pero se tuvo que efectuar un notable revestimiento de su acceso para combatir los efectos de movimientos de ladera y caída de piedras. La IV fué emboquillada casi a nivel del mar, directamente en un afloramiento del basalto por entre el recubrimiento.

En la figura 4 se muestra la disposición en planta de cada una de las galerías en 1972 y en la tabla 1 sus principales características. Mientras en las galerías I y II apenas se ha realizado nuevas obras, las III y IV han sido prolongadas y se han establecido nuevos sondeos de drenaje frontal entre 1973 y 1975, con longitudes entre 100 y 200 m por dren. Estas galerías III y IV son de mayor sección que las otras y es posible recorrerlas con facilidad.

Mientras el caudal de los sondeos de la galería I no puede ser controlado, si es posible en los de la galería III ya que disponen de un tubo de emboquillado cementado y de una válvula de regulación. Ello permite adaptar el caudal de producción de la galería a la demanda, dentro de ciertos límites y evitar así desperdiciar agua en momentos de menores necesidades. En la galería III la mayoría de los sondeos son horizontales, en buena parte en el frente de avance de la galería y con disposición radial, pero además existen otros verticales en el tramo saturado, y por lo tanto surgentes. Su caudal puede incrementarse por encima del máximo natural, mediante el bombeo con aire comprimido, aprovechando la instalación existente para los trabajos de perforación en curso, y lo mismo puede efectuarse en otros sondeos verticales de carácter piezométrico perforados en la zona no saturada de la galería. Estos modos de operación resultan muy interesantes y permiten regular el caudal obtenido, de forma sencilla y eficaz.

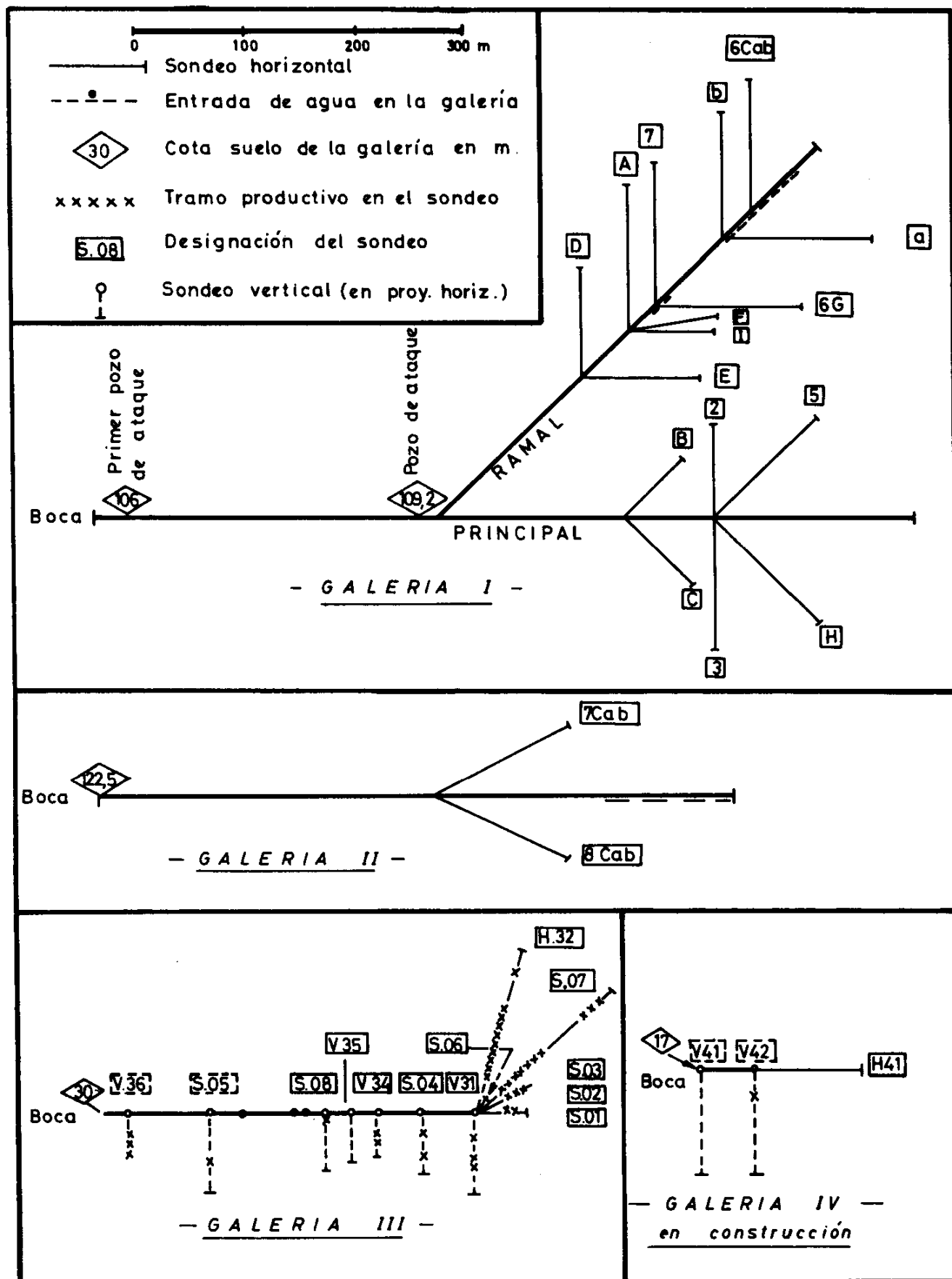


Fig.4.— Plantas de las galerías de Famara, mostrando sus sondeos. Los sondeos verticales están proyectados. Situación a finales de 1972.

SIAMOS-78. Granada (España)

Tabla 1 - Características de las galerías de Famara (datos referidos a finales de 1972)

Características	Galería			
	I	II	III	IV
Longitud en metros	1373	819	357	100
Metros desde la boca al mar	1150	500	70	39
Metros hasta la galería anterior	-	1700	1100	507
Cota de la boca (metros)	106	122	30	17
Rumbo	N 100 E	N 100 E	N 100 E	N 125 E
Longitud de la galería	768+505	820	356	55
Caudal en 1960 (l/s)	2,5	-	-	-
en 1966 (l/s)	2,1	1,2	-	-
en 1969 (l/s)	1,5	2,1	1,2	-
en 1972 (l/s)	1,25	1,4	8	0,0
Nº de sondeos (productivos)	16(5)	2(0)	14(10)	3(1)
Longitud de sondeos (m)	1838	286	1000	208
Caudal de los sondeos (l/s)	0,5	0,0	8(máx 20)	0,0
Presión máxima en sondeos (atm)	0,2	-	2,1	-
Metros productivos de galería	400+500	200	150	0
Inicio de construcción	1955	1963	1968	1971
Fin de obras principales	1964	1971	en obras	en obras
Volumen de agua hasta fin 1972 (hm ³)				
- total	1,3	0,37	0,25	0,00
- de los sondeos	0,26	-	0,13	0,00
m ³ /m de sondeo	140	-	130	-
Cloruros, ppm Cl ⁻ en salida	650	1000	2100	650

Observaciones:

- Galería I: Galería principal de 768 m y ramal de 505 m que se inicia a 320 m de la boca, inclinado 45° a la izquierda.
- Galería II: Sondeos perforados en zona no saturada.
- Galería III: El caudal se regula con las válvulas de los sondeos según demanda. Hay sondeos horizontales, inclinados, verticales y piezométricos. Los caudales descienden rápidamente con el tiempo.
- Galería IV: En construcción. Sondeos horizontales en zona no saturada. Los verticales son piezométricos. Se cortan algunos niveles con un poco de agua colgada.

6. - ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS CAUDALES DE LAS GALERÍAS

El análisis hidráulico de los caudales de las galerías de Famara debe tener en cuenta:

- El efecto de los trabajos de prolongación de las galerías.
- El efecto de perforación de sondeos de drenaje.
- La existencia de una carga de agua variable a lo largo del tiempo y de la galería.
- La penetración parcial de la galería en el domo de agua.

La galería se asimila, o bien a un manantial que drena en macizo rocoso, o bien a un dren, suponiendo que:

- Existe una red tridimensional de zonas permeables y fisuras conductoras de agua, tal como se ha observado a partir de ensayos y controles de interferencia entre sondeos.
- Aunque el medio es en detalle muy heterogéneo (en los drenes de la galería III se ha observado que en promedio existen 2 a 3 tramos permeables por cada 100 m lineales, abarcando del 10 al 20 % de la longitud penetrada), cuando el volumen de influencia es grande (por ejemplo con una dimensión de 100 a 500 m), el medio es de características hidráulicas suavemente cambiantes (quasihomogéneo), tal como después se confirma.
- El nivel freático virtual cambia suavemente, aunque su pendiente es grande a causa de la baja permeabilidad de los materiales.
- La irregularidad en la reducida recarga no afecta pues es promediada en el tránsito por el gran espesor de medio no saturado (de 100 a 500 m, con un tiempo de tránsito de varias decenas de años por lo menos).
- Los cambios en la presión atmosférica solo inducen pequeñas variaciones en la producción de las galerías y en sus drenes.
- Los avances de las galerías o la instalación de drenes no se hace a saltos instantáneos, aunque ello puede admitirse después de algunos meses o años después, pero no para los primeros tiempos.
- En los primeros tiempos después de la construcción de un tramo de galería o de un sondeo se produce un rápido drenaje de los tramos

SIAMOS-78. Granada (España)

más permeables, pero al aumentar el volúmen de influencia con el tiempo, el drenaje se realiza según las características medias y según leyes asintóticas.

Las galerías drenan preferentemente reservas en el macizo, aunque también captan parte del débil flujo de agua de recarga que circula hacia el mar, después de haber descontado las salidas por los manantiales y rezumes. Este caudal de base permanente puede estimarse a grosso modo calculando la disminución porcentual de gradiente hidráulico entre la zona activa de la galería y el mar, suponiendo que todo el macizo es permeable y que los gradientes aguas arriba no se alteran sensiblemente.

Puede estimarse, como primera aproximación, que (Custodio, 1974b):

$$Q_b = \frac{4}{3} q_0 D \left(1 - \frac{H}{2Li_0} \right)$$

Q_b = caudal de base de la galería
 D = distancia de influencia lateral de la galería
 H = altitud de la zona productiva de la galería
 L = distancia efectiva entre la costa y la zona productiva de la galería
 q_0 = caudal de salida natural al mar por unidad de longitud de costa, deducido de la recarga
 i_0 = pendiente natural de la superficie freática

Para las diferentes galerías, con un error probable entre triple y tercio, se obtiene:

Galería	I	II	III	IV
Q_b , m ³ /dfa	4	2	2	2

Las diferentes leyes de estudio del agotamiento de caudales, con las que se han obtenido resultados aceptables en base a un ajuste suficiente a las observaciones reales, son:

a) Ley exponencial $Q - Q_b = (Q_0 - Q_b) \cdot e^{-\alpha t}$

Q = caudal en el tiempo t

Q_b = caudal de base (residual para $t = \infty$)

Q_0 = caudal inicial teórico (diferente del caudal inicial observado)

SIAMOS-78. Granada (España)

α = constante que depende de las características hidráulicas y dimensiones del sistema

Es válida cuando $t > 0,5\alpha$ (Llamas, 1976)

La representación de $\log (Q-Q_b)$ en función de t debe ser una recta para $t > 0,5\alpha$, cuya pendiente es $-2,3/\alpha$ y cuya ordenada en el origen es Q_0-Q_b .

En un macizo ideal se puede establecer que:

$$\alpha = \frac{n^2}{4d^2} \frac{T}{S}$$

$$Q_0 = 2 \frac{\Delta h}{d} T \cdot L$$

T = transmisividad = $k \cdot b$ = permeabilidad $\times$ espesor saturado
 S = coeficiente de almacenamiento
 T/S = difusividad hidráulica
 d = distancia a la divisoria de aguas en el macizo
 L = longitud efectiva drenante de la galería
 Δh = descenso piezométrico efectivo producido por la galería

Utilizando valores apropiados para las galerías, I (fig. 5) y II, en las que la serie de datos es suficientemente larga (los valores entre paréntesis pueden tener un error considerable):

	α años ⁻¹	Q_0 m ³ /dfa	T/S m ² /dfa	(T) m ² /dfa	(S) -	(k) m/dfa	Q_b mejor m ³ /dfa
Galería I	0,10	250	100-150	15-25	0,13-0,20	0,1	0-20
Galería II	0,2	150	200-500	75-110	0,2 -0,3	0,5	0

b) Ley de la raíz inversa $Q-Q_0 = (Q_0-Q_b) (1+\beta t)^{-2}$

β = constante que depende de las características hidráulicas y dimensiones del sistema.

Es apropiada al análisis del agotamiento del caudal de manantiales que drenan un acuífero libre (Llamas, 1976). Coincide con la Ley exponencial para $\beta = \alpha/2$ cuando $\alpha \cdot t \ll 1$. Ambas funciones tienden a $Q = Q_b$ para $t \rightarrow \infty$, aunque la exponencial tiende más rápidamente. La ley de la raíz inversa, al igual que la exponencial, no es válida durante los primeros tiempos del drenaje.

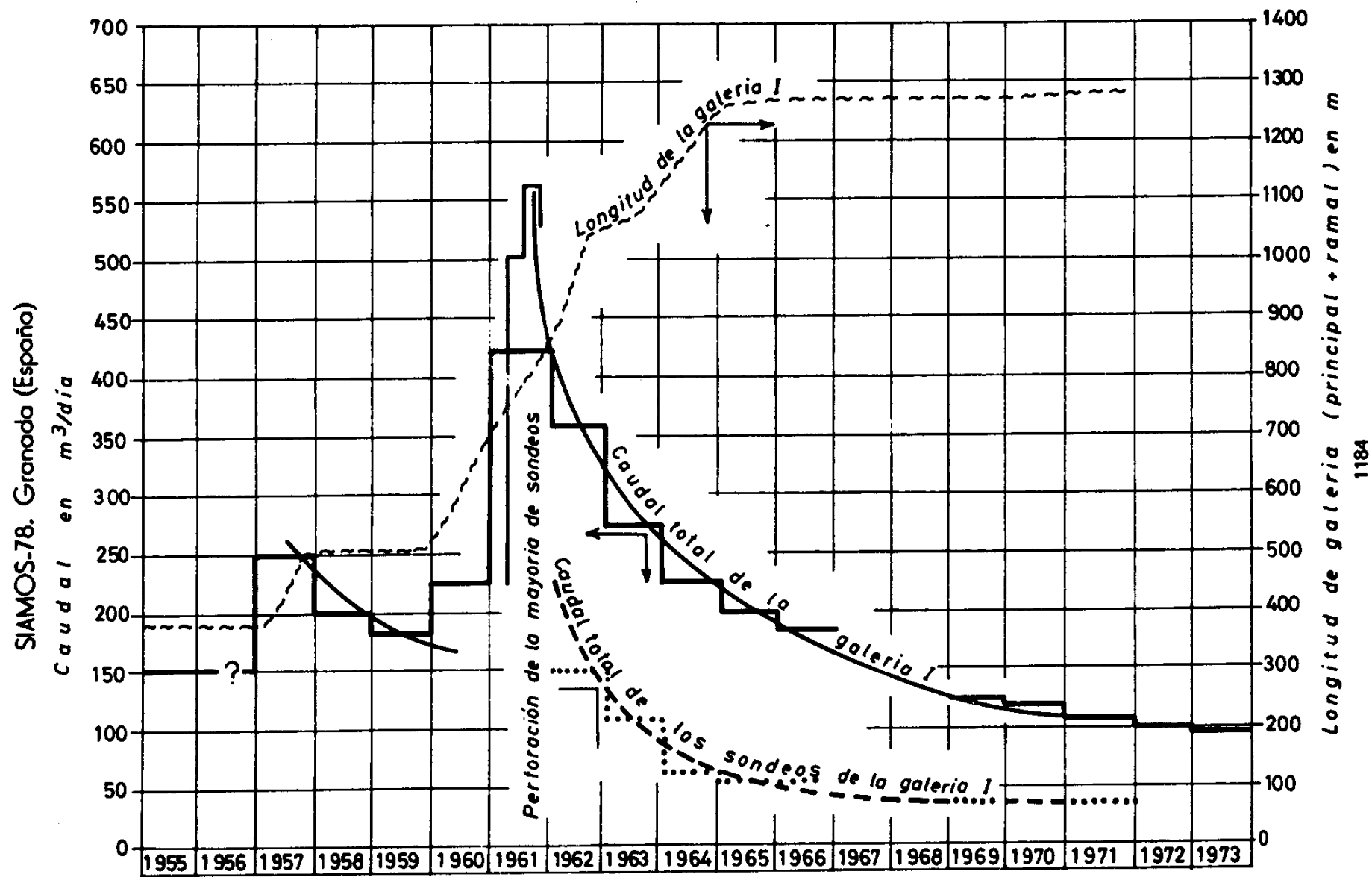


Fig. 5.— Evolución de los caudales de la Galería I y de las obras de prolongación.

SIAMOS-78. Granada (España)

Si se escribe:

$$(Q-Q_b)^{-\frac{1}{2}} = (Q_o-Q_b)^{-\frac{1}{2}} + \beta(Q_o-Q_b)^{-\frac{1}{2}} \cdot t$$

la representación de $(Q-Q_b)^{-\frac{1}{2}}$ en función de t debe ser una recta de pendiente $\beta(Q_o-Q_c)^{-\frac{1}{2}}$ y ordenada en el origen $(Q_o-Q_c)^{-\frac{1}{2}}$

En un macizo ideal puede establecerse que:

$$\beta = \frac{2 \Delta h \cdot k}{S \cdot d^2} \quad H_o = \text{espesor saturado inicial}$$

$$Q_o \approx 4 \frac{\Delta h \cdot k \cdot H_o \cdot L}{d}$$

Utilizando valores apropiados para la galería I, se obtiene:

	β años ⁻¹	Q_o m ³ /dfa	k m/dfa	S -	Q_b mejor m ³ /dfa
Galería I	0,068	320	0,22-0,17	0,11-0,16	20

c) Ley de la inversa de cuadrados

Es preferentemente válida para los primeros tiempos de drenaje, para los cuales $Q \gg Q_b$ de modo que $1/Q^2 \approx \gamma \cdot t$. Debe cumplirse que $t < 0,3 d^2 S/T$ (Custodio, 1976), lo cual supone que la depresión de drenaje no alcanza la divisorio de aguas del macizo. Representando $1/Q^2$ en función de t debe obtenerse una recta de pendiente γ , que pase por el origen de coordenadas.

En un macizo ideal, con poca variación del espesor saturado,

$$\pi/\gamma = 4 \Delta h^2 \cdot L^2 \cdot S \cdot T$$

Otros tipos de tratamiento (Custodio, 1976b) hacen variar el factor 4 entre 0,25 y 3, aunque los valores más adaptados al problema planteado varían entre 1 y 3.

Utilizando valores apropiados para las galerías I y II, se obtiene:

	γ dfa ² /m ⁶ /año	$T \cdot S$ m ² /dfa
Galería I	$(5 \div 10) \cdot 10^{-6}$	1 ÷ 4
Galería II	$(0,35 \div 0,4) \cdot 10^{-4}$	~10

SIAMOS-78. Granada (España)

Como $S < 1$, los valores de T son mayores a los obtenidos anteriormente, como en principio cabía esperar dada la mayor influencia de la zona descomprimida y fracturada en el entorno de la galería a consecuencia de su excavación, drenaje de fisuras mayores y efecto de los explosivos. Se han ensayado otras leyes sin justificaciones teóricas razonables (Custodio, 1972, 1974), pero no se comentan por solo ser útiles para la extrapolación, y de ellas solo la de la inversa de caudales resulta bien ajustada ($1/Q = \omega + \delta \cdot t$).

El agotamiento del caudal de los sondeos de drenaje practicados en las galerías puede estudiarse de forma similar al de las galerías, si bien existen mayores dificultades debido a:

- Interferencia entre sondeos y con la galería (salvo que se considere la producción conjunta de sondeos y galería)
- Efecto de los sondeos en construcción sobre los en producción
- Efecto de la regulación del caudal de los sondeos mediante la válvula de cabeza.

Por ello este estudio está aún por realizarse y dependerá de la representatividad de los datos que se obtengan. La aplicación de la ley exponencial en uno de los sondeos de la galería I (sondeo D) permite calcular, con valores apropiados de los valores geométricos del macizo afectado por el sondeo:

$$\alpha = 0,42 \text{ años}^{-1}; Q_0 = 11,5 \text{ m}^3/\text{día}; T/S = 15-40 \text{ m}^2/\text{día}; \\ T = 0,8-1,1 \text{ m}^2/\text{día}; S = 0,03-0,04; k \approx 0,01;$$

Sin un análisis más profundo no pueden tomarse estos datos como fiables, que parecen dar valores de T y S demasiado bajos.

El estudio de la superficie piezométrica proporciona valores de la permeabilidad mucho menores, del orden de $T = 0,2 \text{ m}^2/\text{día}$ y $k \approx 0,001 \text{ m/día}$. No es de extrañar la disparidad de estos valores con los anteriores, ya que los deducidos de la superficie piezométrica son solo en dirección E-W, hacia el mar, y únicamente ponen de manifiesto la elevada anisotropía. El elipsoide permeabilidades tiene un eje menor en dirección E-W y las permeabilidades mayor y media están en un plano vertical de orientación N-S.

Durante la prolongación del ramal de la galería I se observó que el caudal de los sondeos de drenaje próximos al frente de avance disminuía temporalmente para luego aumentar de nuevo. Además de un efecto de interferencia a causa de la producción de agua del nuevo tramo de galería, existe un efecto de brusco aumento de la porosidad local a causa de la perforación (uso de explosivos y descompresión bajo algunos cientos de metros de montera). Dada la escasa permeabilidad del material, el aumento del volumen de poros y fisuras produce una pérdida de potencial hidráulico que tarda varios meses en restablecerse, afectando a la producción de los sondeos y tramos de galería próximos.

7. - ENSAYOS HIDRAULICOS EN LOS SONDEOS DE LA GALERIA III

En varios de los sondeos de drenaje de la galería III (horizontales y verticales) se han realizado ensayos para obtener mayor información sobre las características hidráulicas de los materiales. En esos ensayos de variación de la presión con el tiempo después del cierre tras un largo periodo de producción, la valoración se ha realizado suponiendo válida la aproximación logarítmica de Jacob, por lo menos durante los primeros minutos, calculando con ello T (transmisividad) y una estimación del valor aproximado de S (coeficiente de almacenamiento) si se admite que el radio del sondeo es asimilable al radio eficaz de cálculo. Dada la corta duración de los ensayos (algunas horas) y debido a que solo son interpretables los datos de los primeros 5 a 15 minutos, el valor de S no representa la porosidad eficaz del medio, sino un valor en relación con la reacción elástica del medio.

En las diferentes curvas se observa:

- La puesta en presión de los sondeos verticales surgentes es inmediata, pero en los sondeos horizontales, a menos que el caudal sea elevado, existe un periodo de llenado de la porción vacía del tubo que enmascara los resultados.
- El aumento de presión registrado con el tiempo se amortigua progresivamente por diferentes causas:
 - a) Interferencia con el caudal de otros sondeos y con la producción directa de la propia galería, tanto más acusado cuanto más sondeos próximos existan y/o más productiva sea la galería en el entorno.

SIAMOS-78. Granada (España)

b) Efecto de penetración parcial de los sondeos.

c) Posible efecto de variación de la apertura de las fisuras al aumentar la presión.

Los resultados obtenidos son:

Sondeo	Caracter zona		Transmis. T m ² /dfa	Perm. m ² /dfa		Coef. almacen. S
				media	tramos produc.	
S.04	Vert.	No product.	2,6-3,3	0,05	0,25	0,0005
S.31	Vert.	Productiva	7-9	0,11	0,8	0,009
S.06	Ascend.	Productiva	0,5	0,05	0,015	0,02

Se realizaron ensayos de inyección para estudiar la relación caudal/presión, encontrándose que es aceptablemente constante, lo cual demuestra que el flujo es lineal y por lo tanto que es aplicable la ley de Darcy. De los valores de esta relación se obtiene:

Sondeo	S.02	S.01 por interfe- rencia con S.02	S.06
Transmisividad m ² /dfa	6,3	3,2	0,8
Permeabilidad media m/dfa	0,15		0,048
Tramo productivo	0,75		0,11

En ensayos similares de producción se obtuvo la misma relación lineal (fig. 6) y los valores:

Sondeo	SH.32	S.07	SV.31	S.03	S.02	S.01	S.04
Presión cierre atm.							
medida	2,0	1,8	1,9	2,1	2,2	2,1	1,7
máxima	2,9	2,8	2,3	2,5	2,5	2,5	1,9
Producción l/s/m	0,21	0,22	0,13	0,09	0,06	0,045	0,03
Transmisiv. m ² /dfa	18	19	11	8	5	4	2,5
Permeabilidad m/dfa							
media	0,11	0,12	0,14	0,15	0,12	0,09	0,04
tramo productivo	0,24	0,27	1,0	0,30	0,7	0,5	0,21

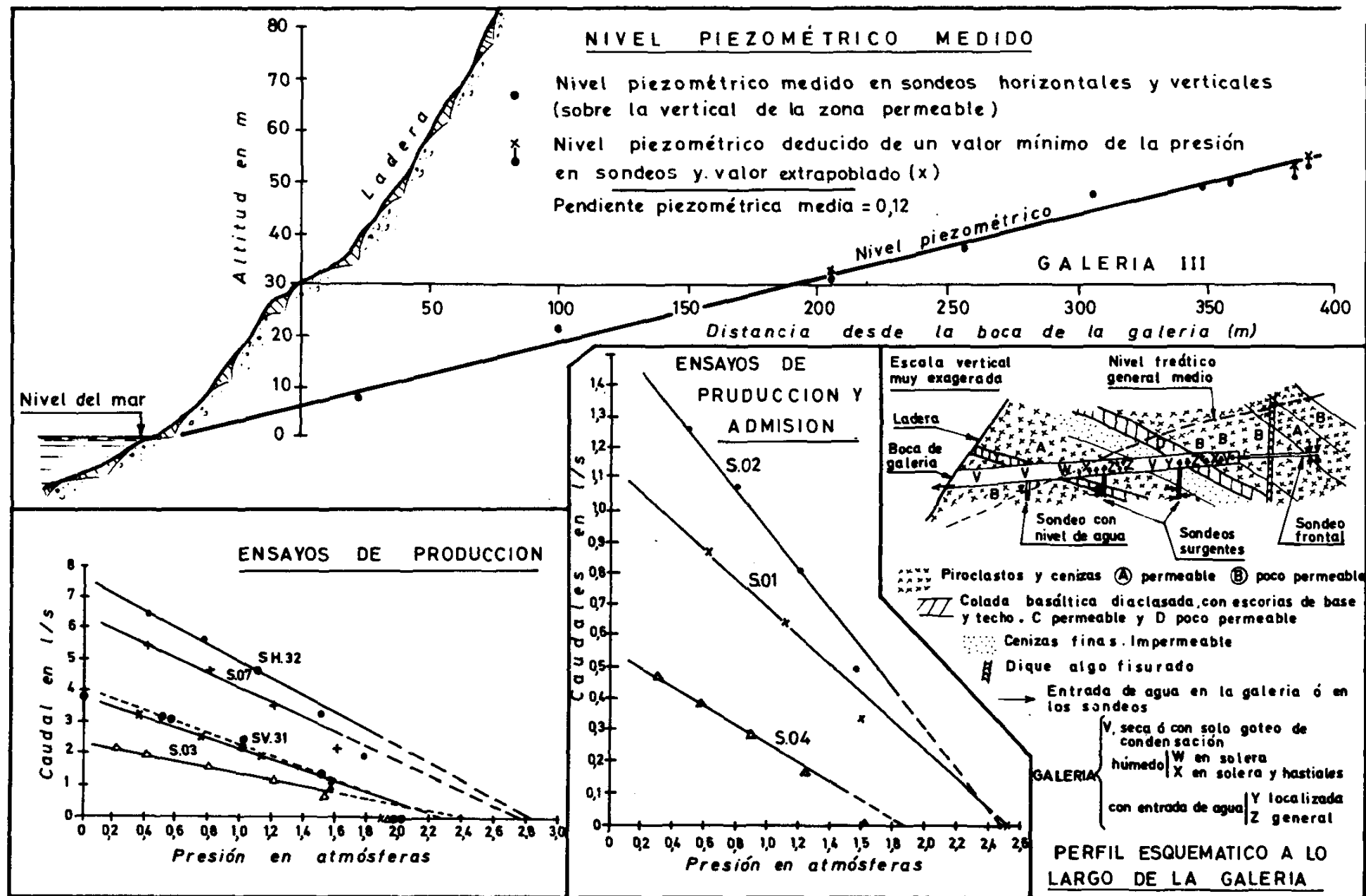


Fig. 6.— Ensayo de producción y admisión en los sondeos de la Galeria III de Famara y perfil piezométrico medido con los datos de los sondeos

Dado que cuando el sondeo está cerrado o próximo a estar cerrado se producen pequeñas fugas por los cierres o a través de fisuras, no se llega a medir la presión máxima, pero esta puede deducirse de la extrapolación de la recta caudal-presión hasta el caudal nulo.

En principio no existe una relación clara entre orientación y posición del sondeo y la permeabilidad media. Los sondeos verticales se comportan de forma similar a los horizontales, si bien parece existir una tendencia no suficientemente confirmada a que aquellos aparezcan algo menos permeables. Es de destacar que a pesar de la notable heterogeneidad de materiales atravesados, distribución de zonas permeables y posición de los sondeos, la dispersión de valores de permeabilidad es muy pequeña.

8. - ASPECTOS GEOHIDROQUIMICOS DE LAS AGUAS DE LAS GALERIAS DE CAPTACION

Según Fuster, Fernández Santin y Sagredo (1968), los basaltos tabulares de Famara son de carácter alcalino con carácter frecuentemente de oceanitas, aunque hacia la base del macizo se presenta una mayor frecuencia de basaltos olivínicos. Se presentan inclusiones más alcalinas que corresponden a gabros y a veces a monzonitas nefelínicas.

El agua obtenida de las galerías es notablemente salina y su contenido en sales varía entre 1,4 y 8 g/l, aunque su composición iónica es similar, lo que demuestra una génesis común. Se trata de aguas cloruradas sódicas, con relación r_{Na}/r_{Cl} ($r = \text{meq/l}$) > 1 para las menos salinas y < 1 para las más salinas. La relación r_{Mg}/r_{Ca} es notablemente mayor que 1. Al aumentar la salinidad, la concentración de Ca se mantiene aproximadamente constante y tiende a aumentar la relación r_{Mg}/r_{Na} . La relación r_{SO_4}/r_{Cl} se mantiene en el entorno del valor 7,2, menor que en el agua marina.

La salinidad es incluso elevada para los manantiales y rezumes de los acuíferos colgados, entre 0,8 y 1,3 g/l. Esta salinidad es de origen climático por fuerte concentración de un agua de lluvia que contiene entre 10 y 15 ppm de Cl^- en las zonas altas.

La salinidad aumenta rápidamente por debajo del nivel freático y también lateralmente al pasar a zonas menos permeables como se ha constatado en el estudio del agua de los sondeos de las galerías 1

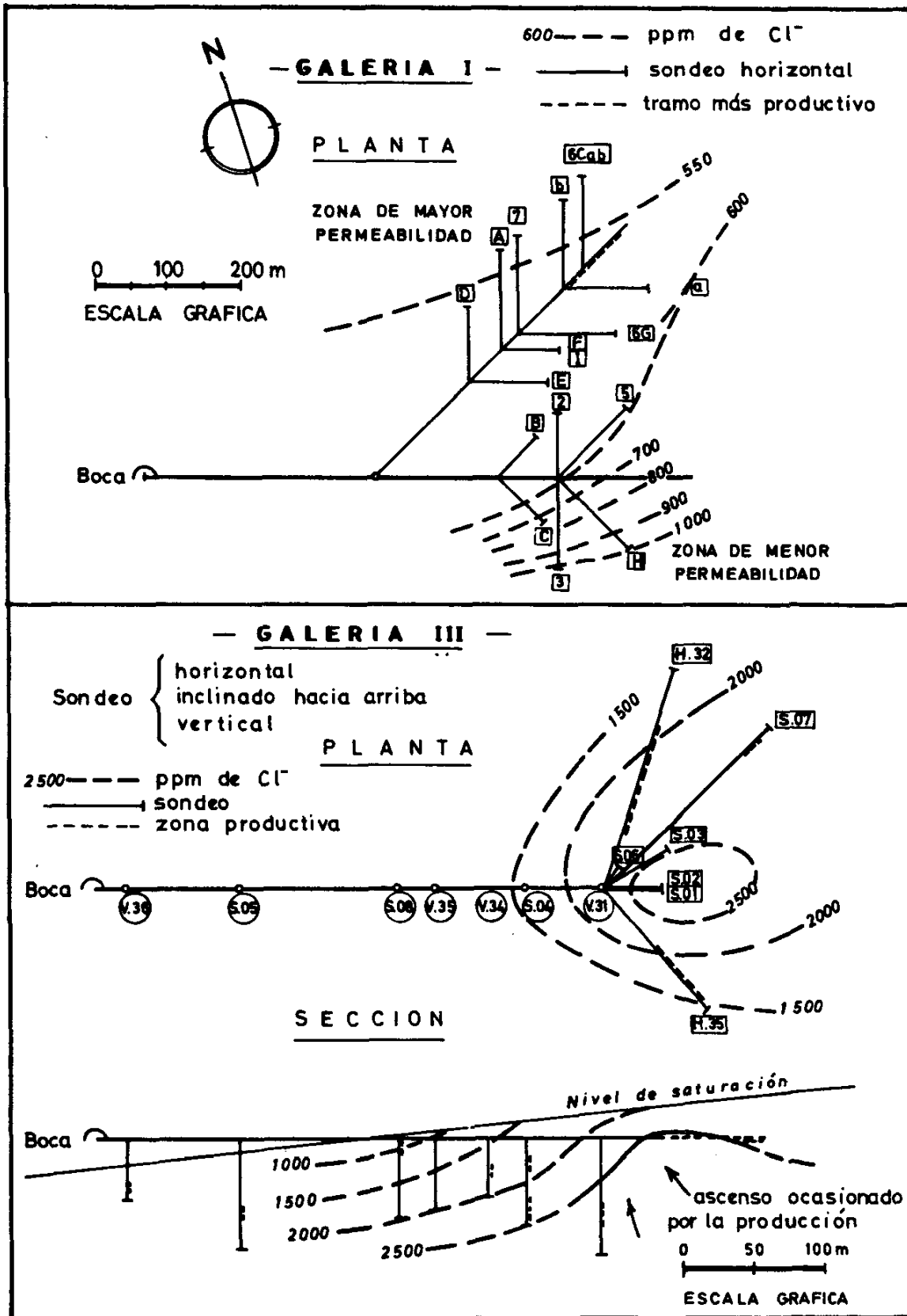


Fig. 7.—Distribución de la salinidad, en ppm de ion cloruro, en el entorno de las galerías I y III de Famara

SIAMOS-78. Granada (Españo)

(un lado es menos permeable que el otro) y III (existen sondeos verticales y la estratificación es clara a pesar de la alteración producida por la propia producción de la galería en su frente), tal como se muestra en la figura 7.

El contenido en tritio de estas aguas es nulo (los valores no nulos corresponden a contaminación atmosférica de las muestras) y está prevista una campaña de medidas de radiocarbono, cuya interpretación parece posible en las circunstancias geohidroquímicas del macizo.

Este incremento de salinidad parece que solo puede atribuirse a una lentísima velocidad de circulación del agua hacia el mar (Custodio, 1974c; 1978), con tiempos de residencia media en el terreno seguramente superiores a varios centenares de años y probablemente superiores a decenas de miles de años en las capas profundas o menos permeables.

El lavado de muestras de polvo permite determinar que su contribución a la salinidad es pequeña, en especial en ión cloruro. El lavado de muestras de roca quebrantada, utilizando agua neutra y acidulada, muestra igualmente un pequeño aporte de Cl^- y $\text{SO}_4^{=}$, lo cual señala que el incremento de salinidad antes mencionado en ausencia de aportes de esas sales por actividad volcánica, solo puede explicarse por una muy lenta circulación y un reducido número de renovaciones del agua en áreas profundas, a pesar del elevado gradiente piezométrico.

El contenido en fosfatos procedentes de la roca, es algo elevado, entre 0,3 y 1,2 ppm, y tiende a disminuir al aumentar la salinidad. La relación $r\text{Ca}/r\text{Sr}$ que vale entre 500 y 1000 para las aguas menos salinas, disminuye hasta 100 para las aguas más salinas. La relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ vale del orden de 200 a 1000 para las aguas menos salinas, de acuerdo con el contenido en el agua de lluvia y también en el agua marina, que es la fuente de sales solubles que se incorporan al agua de lluvia. En las aguas más salinas la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ crece hasta valores del orden de 10000, lo cual parece confirmar que el aumento de ión cloruro no es por aporte de sales marinas, en conformidad con lo que se puede deducir por otros caminos, sino de aportes del terreno.

El estudio de iones metálicos menores no aporta ningún nuevo dato de interés.

9. - AGRADECIMIENTOS

Los trabajos realizados han sido realizados en un marco de trabajo con el Servicio Geológico de Obras Públicas dentro del entusiasmo por los temas hidráulicos e hidrológicos impuesto por el jefe de la delegación en Canarias, D. José Sáenz Oiza, al que el autor agradece no solo las facilidades de acceso a los datos, sino su consejo, ayuda y puesta a disposición de medios de ensayo y análisis. El autor quiere mencionar además la ayuda y colaboración del Ingeniero D. José Jimenez, del químico D. José Ramón Vasallo y del Ingeniero D. Julio Lobato.

10. - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CUSTODIO, E. (1973). - Recursos de agua de Lanzarote: reoconocimiento general. Estudio Científico de los Recursos de Agua de las Islas Canarias. Gobierno Español-UNESCO-PNUD. Las Palmas. 77 págs. (edición reducida).

CUSTODIO, E. (1974). - Flujo de agua subterránea y existencia de un nivel de saturación en las formaciones volcánicas de la isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Arrecife de Lanzarote. 80 págs (en prensa).

CUSTODIO, E. (1974b). - Datos sobre la hidráulica de las galerías de captación de agua subterránea en el macizo de Famara, Lanzarote (Islas Canarias, España). Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos, Arrecife de Lanzarote. 45 págs. (en prensa).

CUSTODIO, E. (1974c). - Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Arrecife de Lanzarote. 48 págs. (en prensa).

CUSTODIO, E. (1975). - Hidrogeología de las rocas volcánicas. Atti del 3^{er} Convegno Internazionale sulle Acque Sotterranee, Palermo. Págs. 33-69.

CUSTODIO, E. (1978). - Geohidrología de terrenos e islas volcánicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid. 270 págs.

CUSTODIO, E.; SAENZ OIZA, J. (1972). - Estudio geohidrológico del macizo de Famara, Lanzarote. Dirección General de Obras Hidráulicas. Barcelona-Las Palmas. 264 págs. (edición reducida).

CUSTODIO, E.; SAENZ OIZA, J. (1973). - Hydrology of Famara's volcanic block supply galleries (Lanzarote Island, Spain). Atti del 2º Convegno Internazionale sulle Acque Sotterranee. Palermo, págs. 487-494.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. (1976). - Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2 vols. 2350 págs. Secciones 8, 9, 10 y 15.

FUSTER, J.M.; FERNANDEZ SANTIN, J.; SAGREDO, J. (1968). - Geología y volcanología de las Islas Canarias, Lanzarote. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Lucas Mallada, Madrid, 177 págs.

HAUSEN, H. (1959). - On the geology of Lanzarote, Graciosa and the Isletas. Societas Scientiarum Fennica, Commentationes Physico-Mathematicae. Vol. XXIII, nº 4, Helsinki-Las Palmas. 117 págs.

HERAS, R. et al. (1972). - Informe general 2 del estudio científico de los recursos de agua de las Islas Canarias. Dirección General de Obras Hidráulicas-Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid. Volumen de Lanzarote.

LLAMAS, M.R. (1976). - Relación entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Hidrología Subterránea. Ed. E. Custodio y M.R. Llamas. Vol. I, Sección 11. Ediciones Omega, Barcelona. págs. 1097-1157.

SAENZ OIZA, J.; FERNANDOPULLE, D.; HERAS, R.; CUSTODIO, E. (1975). - Estudio científico de los recursos de agua de las Islas Canarias. Dirección General de Obras Hidráulicas-UNESCO-PNUD. Las Palmas-Madrid. 5 vols.