

**INFORME ACERCA DE LA VIABILIDAD
DE LA GALERIA DE MUITA AGUA
ISLA DE SANTIAGO**

(REPUBLICA DE CABO VERDE)

mayo 1992



INFORME ACERCA DE LA VIABILIDAD DE LA GALERIA DE MUITA AGUA,
ISLA DE SANTIAGO, REPUBLICA DE CABO VERDE.

AUTORES

Carlos Soler Liceras
Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos.

José M. Navarro Latorre
Geólogo.

mayo 1992

INFORME ACERCA DE LA VIABILIDAD DE LA GALERIA DE MUITA AGUA, ISLA DE SANTIAGO, REPUBLICA DE CABO VERDE.

INDICE

	páginas
I.- INTRODUCCION	
II.- RESUMEN Y CONCLUSIONES	
III.- INVESTIGACION REALIZADA POR EL BURGEAP	
III.1.- Metodología general de exploración.....	pag. 4
III.2.- Trabajos realizados en Muita Agua.....	pag. 5
IV.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL BURGEAP	
IV.1.- Unidades hidrogeológicas de la cuenca.....	pag. 7
IV.2.- Información procedente de la prospección geofísica	pag 10
IV.3.- Información procedente de los sondeos mecánicos	pag. 11
IV.4.- Información procedente de los manantiales.....	pag. 13
IV.5.- Morfología y relleno del valle fósil.....	pag. 16
IV.6.- Cálculo de los caudales de circulación.....	pag. 20
IV.6.1.- Método del balance hídrico.....	pag. 20
Cálculo de los máximos caudales disponibles..	pag. 28
IV.6.2.- Método de los ensayos de bombeo.....	pag. 30
Cálculo de los caudales disponibles y captables	pag. 36
BIBLIOGRAFIA	

INFORME ACERCA DE LA VIABILIDAD DE LA GALERIA DE MUITA AGUA, ISLA DE SANTIAGO, REPUBLICA DE CABO VERDE.

I. INTRODUCCION

La capital de Cabo Verde - Praia - cuenta actualmente con 60.000 habitantes y tiene gravísimos problemas en el suministro de agua potable para la población, suministro que procede tradicionalmente de algunas fuentes situadas en los alrededores, a las que últimamente se ha añadido el caudal bombeado en cierto número de pozos.

Con objeto de mejorar la dotación hídrica, el Burgeap comenzó a desarrollar en 1982 un programa de investigación sobre las aguas subterráneas que circulan en el subsuelo del macizo de Pico de Antonia, en cuya periferia se encuentra Praia. Como resultado de los estudios fueron identificadas diversas cuencas hidrogeológicas en las que, según los cálculos, el agua de lluvia infiltrada superaba ampliamente el caudal de las fuentes existentes en superficie; la diferencia entre ambas cantidades (infiltración menos salidas visibles) daba un excedente que debería

corresponder al flujo subterráneo que se pierde en el mar, el cual podría ser extraído en gran parte por galerías horizontales perforadas en estructuras geológicas adecuadas (valles fósiles excavados en un substrato de permeabilidad baja o nula, rellenos por materiales volcánicos más jóvenes y porosos).

Las cuencas consideradas como más promisorias en cuanto a posibilidad de captación de aguas subterráneas fueron Muita Agua, Achada Mosquito y Joao Varela, diseñándose en cada una de ellas un primer esquema de aprovechamiento mediante galerías (Rapport Burgeap R.606/E.1520/1984). En las tres primeras zonas, destinadas al suministro de Praia, los excedentes teóricos estimados fueron los siguientes:

Estimation des ressources exploitables m ³ /jour			
Zone	Minimum hautement probable	Moyenne probable	Maximun possible
Muita Agua	800	1.000	1.200
Mosquito	300	650	1.000
Joao Varela	350	?	1.000

En la segunda mitad de los 80 se perforó la galería de Bota Rama, más próxima a Praia y destinada a captar los excedentes de la cuenca de Joao Varela; en ella se había realizado una detallada investigación geofísica previa, así como numerosos

sondeos exploratorios sobre la misma traza de la galería o en su proximidad inmediata. Contra todas las previsiones, el caudal alumbrado apenas alcanzó el 15% del estimado teóricamente ($50 \text{ m}^3/\text{día}$ frente a $Q_{\text{min}} = 350 \text{ m}^3/\text{día}$), y tampoco se encontró la estructura geológica pronosticada (valle fósil con fondo permeable).

El fracaso relativo de Bota Rama no sólo ha trastornado las previsiones de abastecimiento a Praia sino que ha hecho surgir dudas sobre la idoneidad de las investigaciones realizadas en la segunda captación programada, es decir, la galería de Muita Agua. Ante ésta situación, el proyecto ha sido aplazado temporalmente y la Junta dos Recursos Hídricos ha requerido la asistencia de dos hidrogeólogos con experiencia práctica en Canarias, archipiélago de naturaleza volcánica muy similar a Cabo Verde y en donde ya existen más de 1.000 galerías construidas.

El presente informe es el resultado de la asistencia mencionada. En él se analizan críticamente los fundamentos geológicos e hidrogeológicos que han llevado al Burgeap a proponer la perforación de la galería de Muita Agua, concediendo atención particular al funcionamiento hidrodinámico de la cuenca y a las estimaciones del caudal que realmente podría drenar la obra propuesta.

II.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

1.- En el esquema hidrogeológico del Burgeap, la galería de Muita Agua debería captar los caudales que circulan por el fondo de un valle fósil ("chenal aquifere"), excavado en un substrato impermeable y rellenado por coladas MPA permeables.

2.- Por problemas de accesibilidad, las investigaciones geofísicas y los sondeos mecánicos de la campaña de 1982-83 no pudieron ser realizados en o cerca del eje del valle fósil, sino en áreas marginales (ver Figura 4). En consecuencia, la información obtenida con estos estudios resulta insuficiente para definir tanto la posición real del fondo del valle como la existencia o no de un "chenal aquifere".

3.- Una de las consecuencias de la anterior indeterminación es que, con los mismos datos de partida, el Burgeap da dos configuraciones distintas para el valle fósil: 1) la del Rapport R.666/E.1718/1986, que sitúa inicialmente el "chenal aquifere" bajo Achada Saco (ver Figuras 1 y 6), y 2) la del Rapport 90-20;45/CV;1991, que lo desplaza más al norte (ver Figuras 2 y 6). Aparentemente, la única información adicional obtenida entre ambos informes es la procedente del sondeo FBE 139, realizado donde teóricamente debía encontrarse el "chenal aquifere", pero que resultó seco.

4.- La revisión del contexto geológico hecha en la presente misión, muestra dos puntos esenciales: 1) la configuración real del valle fósil, visible parcialmente en superficie (Fotos 5 y 6), coincide con la presentada por el Burgeap en 1986 y no con la de 1991, que es la que ha servido de base para proponer el actual emplazamiento, y 2) el fondo del valle fósil está ocupado por un potente paquete de aluviones pre-MPA impermeables, lo que explica que el sondeo FBE-139 no encontrase agua.

5.- De acuerdo con el punto anterior, la circulación del agua subterránea de la cuenca está canalizada, en efecto, por el valle fósil, pero no se realiza en su fondo sino más arriba, en la superficie de contacto entre los aluviones impermeables y las coladas MPA suprayacentes.

6.- Como corroboración de esto último, las fuentes más importantes, que proporcionan un caudal total de $471 \text{ m}^3/\text{día}$, aparecen en o cerca de tal superficie de contacto, en la zona en que el valle fósil ha sido cortado parcialmente por la red de drenaje actual (Ribeira de Santa Clara y da Rede, ver Figura 5)

7.- Aunque parte del valle fósil está oculto bajo el cauce alto de la Ribeira Santa Clara (o de la Ribeira da Rede), es sumamente improbable que en este sector no visible haya mate-

riales de relleno que no sean los aluviones pre-MPA impermeables. De acuerdo con ésto: 1) la galería proyectada atravesará un primer tramo de aluviones antiguos y después entrará en el substrato impermeable general, sin alumbrar nada de agua o haciéndolo en cantidad insignificante; 2) el caudal de las fuentes mencionadas anteriormente ($471 \text{ m}^3/\text{día}$) corresponde a la casi totalidad del agua subterránea que circula por la cuenca en la sección de la galería proyectada, lo cual está en discrepancia con las previsiones de caudal circulante hechas por el Burgeap.

8.- Los caudales estimados por el Burgeap han sido calculados por dos métodos: 1) balance hídrico de la cuenca , y 2) ensayos de bombeo. En el primer método se aumenta considerablemente el coeficiente de infiltración con relación al obtenido en cuencas piloto conocidas ("bassins de calage"), al mismo tiempo que se utiliza un caudal total de salida por las fuentes menor que el real ($340 \text{ m}^3/\text{día}$ frente a $471 \text{ m}^3/\text{día}$). En el segundo método, los valores de transmisividad se han obtenido a partir de ensayos de bombeo en donde no se llegan a estabilizar los niveles y, además, se han incluido dentro de la potencia del acuífero capas que, en realidad, no son permeables. En consecuencia, ambos métodos dan como resultado un caudal disponible superior al real.

9.- Utilizando los datos registrados por el Burgeap en los ensayos de bombeo de la cuenca (variación de los niveles de agua con el tiempo, radio de influencia de los bombeos) se ha

calculado de nuevo el caudal disponible en el acuífero. El resultado es que tal caudal coincide más o menos con el que surge por las fuentes de las Ribeiras Santa Clara y da Rede (471 m³/día), por lo que el excedente que podría ser drenado por la galería de Muita Agua es prácticamente nulo.

10.- Las diferencias de opinión entre el Burgeap y los autores del presente informe podrían ser solventadas con la perforación de un único sondeo de 50 - 60 m de profundidad en la confluencia de las Ribeiras da Rede y Liberao (Figura 4).

III.- INVESTIGACION REALIZADA POR EL BURGEAP

III.1.- Metodología general de exploración

El esquema hidrogeológico en que se basan los trabajos de búsqueda de agua hechos por el Burgeap, es el siguiente:

1.- Los acuíferos están contenidos en las formaciones volcánicas recientes y son alimentados, sobre todo, en zonas topográficamente elevadas, en donde la pluviometría anual oscila entre 300 y 900 mm/m².

2.- El agua subterránea contenida en estos acuíferos circula lentamente hacia el mar, canalizada en el contacto con un substrato menos permeable; la circulación se realiza por una serie de valles fósiles rellenos por materiales volcánicos más recientes. Una parte del agua sale por las fuentes conocidas y otra se pierde en el mar bajo las achadas; es, por tanto, en los valles fósiles situados bajo las achadas donde se deben emplazar las galerías que drenen el agua subterránea circulante.

3.- El volumen de agua captable por las galerías puede ser calculado mediante el balance hídrico, ya que, en una cuenca determinada, el agua subterránea que se pierde en el mar es igual al

volúmen total infiltrado menos lo extraído por las fuentes. Esto implica conocer: a) el caudal total de las diversas fuentes, y b) el valor de la infiltración. El primero se realiza directamente mediante un inventario; para el segundo, en cambio, hay que recurrir a métodos indirectos basados en el balance global (Infiltración = Lluvia - Evaporación - Escorrentía), el cual se estima con ayuda de fórmulas empíricas.

III.2.- Trabajos realizados en Muita Agua

Para localizar y valorar la estructura que canaliza el agua subterránea hacia el mar, el Burgeap ha realizado los estudios siguientes:

- 1.- Geología sobre el terreno, definiendo las principales unidades estratigráficas de la cuenca y su comportamiento hidrogeológico.
- 2.- Campaña de prospección geofísica eléctrica para determinar la profundidad del substrato impermeable por debajo de las formaciones recientes permeables.
- 3.- Campaña de sondeos para encajar la geofísica, precisar la posición del substrato y determinar la presencia de acuíferos.

4.- Inventario de fuentes, estudio de su encuadre geológico y seguimiento del caudal.

5.- Estudio de los contactos entre formaciones antiguas y formaciones recientes para precisar la topografía del relieve fósil cubierto por los materiales jóvenes permeables; con ésto se ha definido la presencia de un paleovalle principal en la cuenca de Muita Agua.

6.- Cálculo del balance hídrico en un período de referencia que incluye 15 años excedentarios (1953-1967) y 15 deficitarios (1968-1982).

7.- Ensayos de bombeo para conocer las características hidrodinámicas de los acuíferos encontrados.

IV.-ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL BURGEAP

IV.1- Unidades hidrogeológicas de la cuenca.

Las unidades estratigráficas establecidas por el Burgeap son las siguientes (Figuras 1 y 2):

- a) Formation Flamengos (Fl), constituida por brechas submarinas muy alteradas y transformadas en arcillas; aparecen cortadas por numerosos diques basálticos.
- b) Complexe eruptif inferieur du Pico Antonia (PAi), que se presenta como una alternancia de lavas y tobas con grado de alteración elevado.
- c) Complexe eruptif du Pico Antonia (PA), caracterizado por una sucesión regular de lavas basálticas muy potentes que alternan con niveles tobáceos de coloración variada.
- d) Coulées du Pico Antonia (MPA), formadas por una sucesión de lavas fluidas, las cuales rellenan una superficie de erosión excavada en los materiales precedentes (Fl,PAi, PA); esta superficie está caracterizada por la presencia de profundos valles fósiles. El techo de la formación es sensiblemente plano, con una ligera inclinación hacia el mar (achadas), aunque aparece cortado por la red actual de ribeiras radiales, fuertemente encajadas.
- e) Formation du Monte das Vacas (MV), que corresponde a la fase de volcanismo más reciente. Está constituida por conos de escorias diseminados por toda la isla, de los que parten coladas

basálticas escoriáceas.

El comportamiento hidrogeológico de éstas unidades tiende a variar de acuerdo con su edad, y así las más antiguas (Fl, PAi) constituyen el substrato impermeable, la PA tiene poca permeabilidad y las más jóvenes (MPA y MV) son el acuífero que canaliza la circulación del agua subterránea.

Comentario

La división establecida por el Burgeap es inobjetable, y lo mismo puede decirse de la valoración hidrogeológica.

El levantamiento geológico de terreno hecho durante la presente misión (Figura 3) apenas difiere del presentado por el Burgeap en 1986 (Figura 1) y 1991 (Figura 2). Las principales modificaciones son:

- Agrupamiento en una sola unidad hidrogeológica (substrato impermeable) de todas aquellas formaciones (Fl, PAi, PA) que preceden la generación del valle fósil principal, aunque algunas de ellas puedan tener localmente una cierta permeabilidad.
- Separación, dentro del relleno del valle fósil, de materiales que tienen distinto significado hidrogeológico-

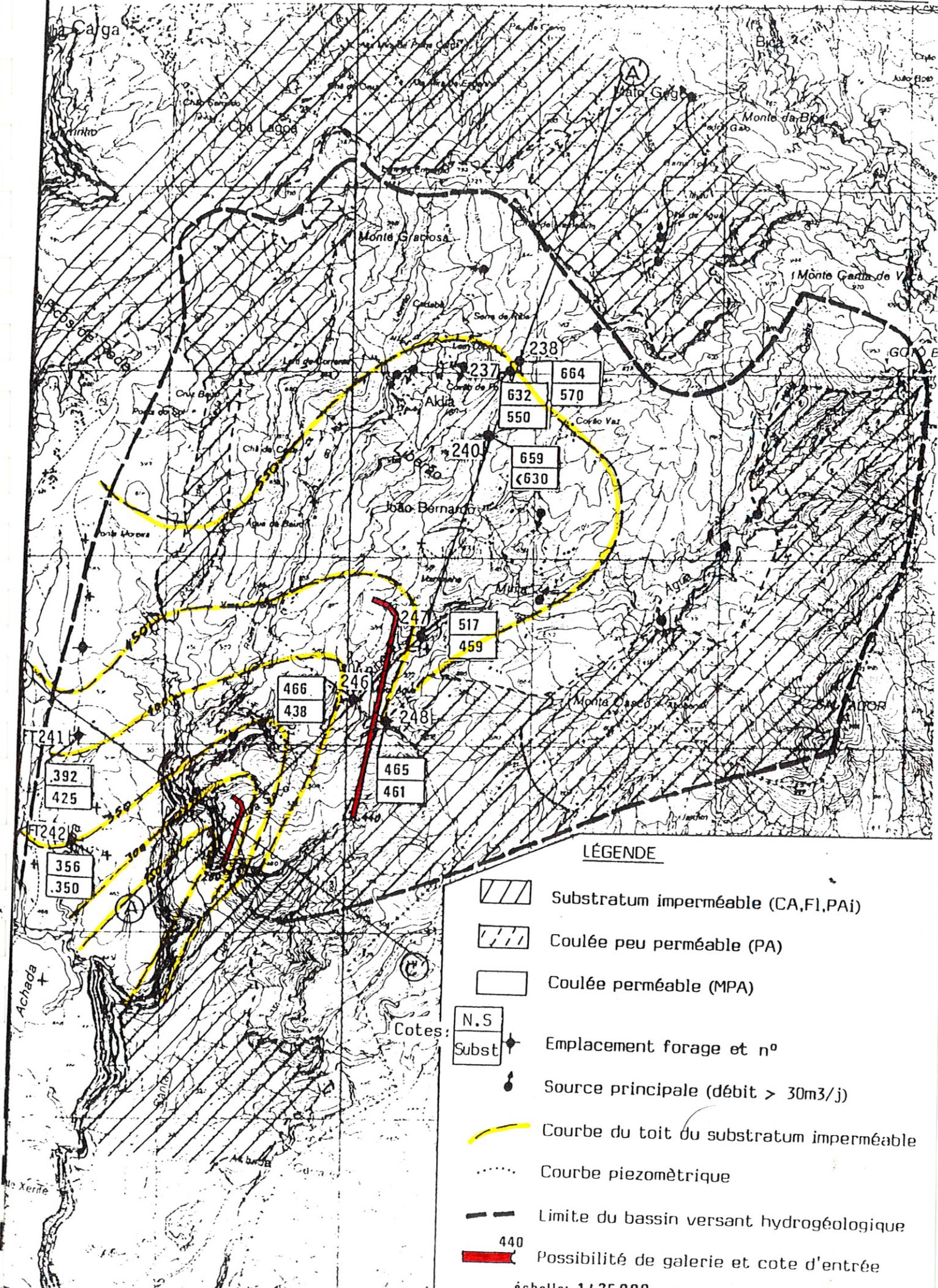
co. Siguiendo esta pauta, hemos diferenciado un potente paquete de aluviones que rellenan el fondo del valle y anteceden la fase de intenso volcanismo en la que se emitieron las lavas MPA.

Los aluviones de fondo (pre-MPA) son conglomerados constituidos por cantos de granulometría muy gruesa; sin embargo, entre los cantos siempre está presente una matriz limo - arcillosa que, en la práctica, los convierte en un conjunto impermeable (Foto 7). Hay intercaladas facies lacustres (limos y arcillas) que, por alteración, han adquirido tonalidades similares a las de la Formation Flamengos (F1), de modo que pueden ser confundidas con esta última (Rapport 90-20;45/CV;1991). A ello contribuye la estructura pillow de una colada basáltica que invadió el lago efímero asociado a estos limos y arcillas (lava de la cascada, cota 300 de la Ribeira Santa Clara); el carácter somero del lago queda evidenciado porque la estructura pillow sólo afecta a la mitad inferior de la colada, mientras que la superior tiene el diaclasado característico de una lava subaérea (Foto 9).

Sobre el significado de éstos aluviones antiguos y su repercusión en la circulación del agua subterránea se habla más extensamente en el apartado IV.5, en donde se discute la morfología y el relleno del valle fósil.

SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE MUITA AGUA

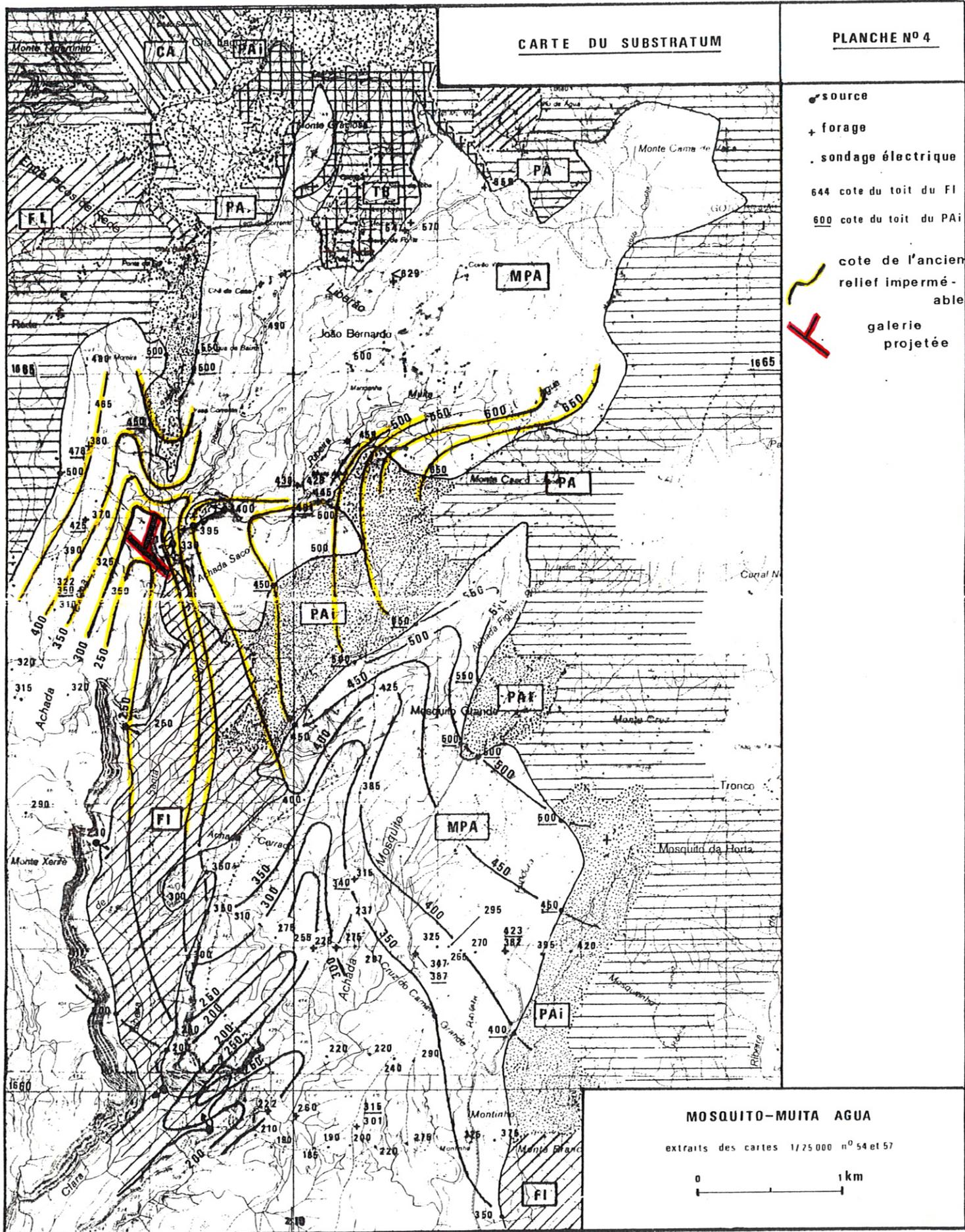
Planche 5

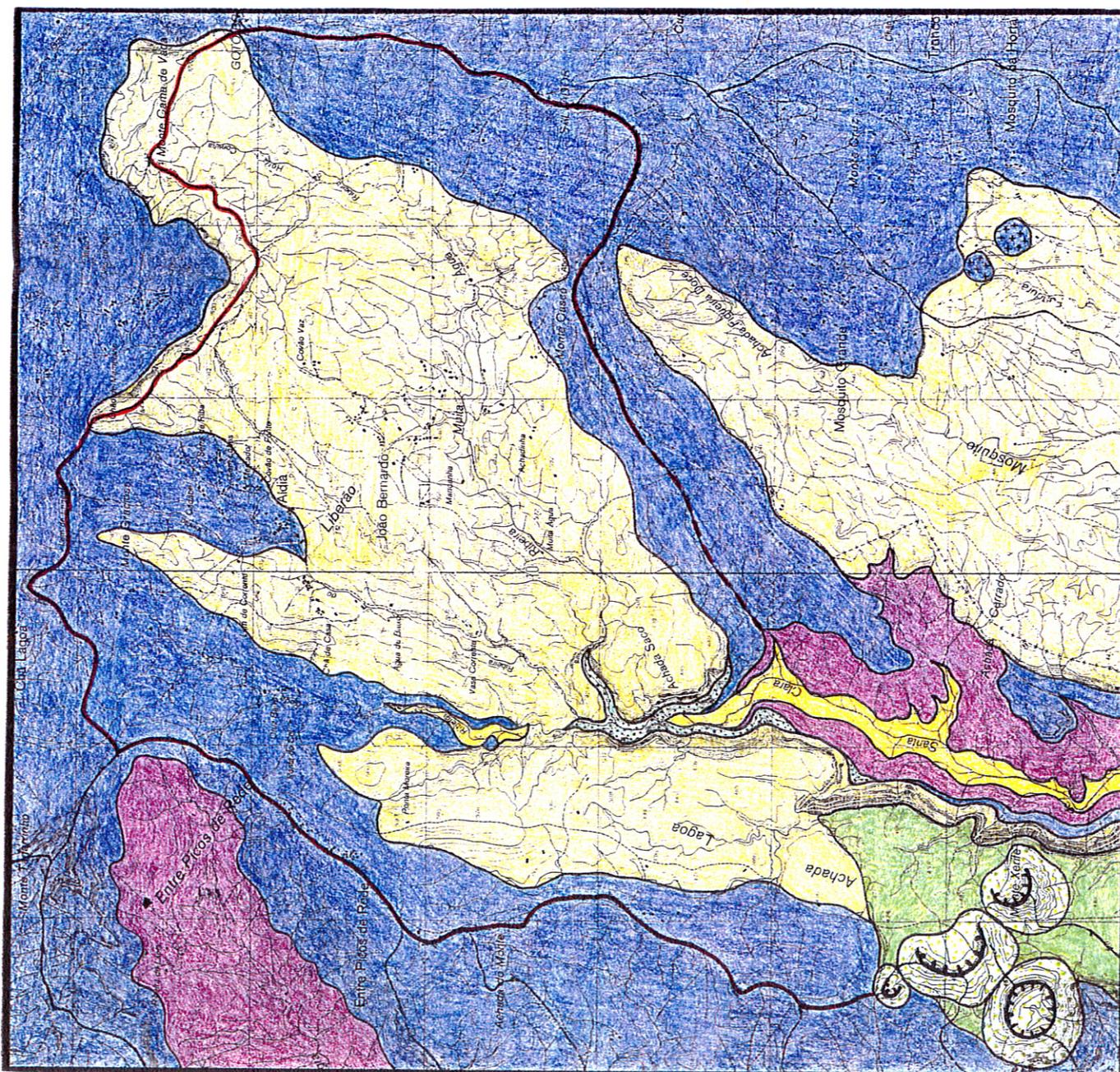


LÉGENDE

-  Substratum imperméable (CA,FI,PAI)
-  Coulée peu perméable (PA)
-  Coulée perméable (MPA)
- | |
|-------|
| N. S |
| Subst |

 Emplacement forage et n°
-  Source principale (débit > 30m³/j)
-  Courbe du toit du substratum imperméable
-  Courbe piezométrique
-  Limite du bassin versant hydrogéologique
-  440 Possibilité de galerie et cote d'entrée





Limite du bassin hydrogéologique

alluvions actuelles

erosion actuel

Formation du Monte das Vacas (MV)

Coulées du Pico Antonio (MPA)

alluvions anciennes (pre-MPA)

erosion → vallée fossile

Complexe éruptif du Pico Antonio (PAI et PA)

soulevement → érosion

Formation Flamengos (FI)

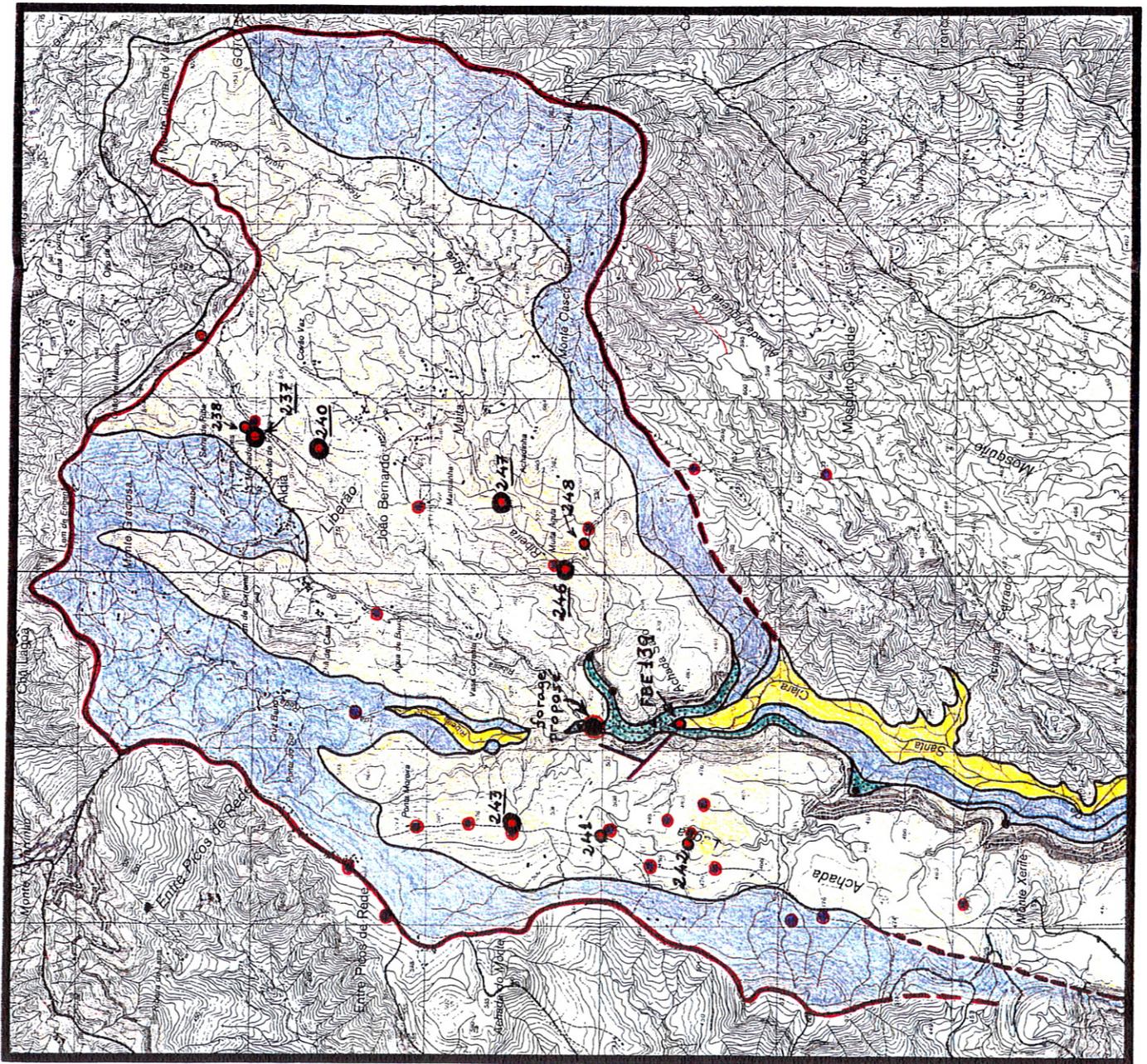
Fig. 3 -- Schema géologique du bassin de Muita Agua.

IV.2.-Información procedente de la prospección geofísica

La campaña de prospección por sondeos eléctricos tuvo lugar en 1983; se realizaron 22 sondeos con AB 2.000 metros, los cuales pusieron de manifiesto el techo del conductor. Una vez encajados sobre los sondeos mecánicos, fueron utilizados para precisar la morfología del substrato impermeable y para localizar eventuales valles antiguos. Los resultados figuran tanto en el esquema hidrogeológico de 1986 (R.666/E.1718/86) como en el de 1991 (90-20;45/CV;1991), aunque la interpretación difiere de uno a otro.

Comentario:

La campaña de geofísica contribuyó a poner de manifiesto que el substrato impermeable de la cuenca tiene, a grandes rasgos, una forma de "gouttiere" que recoge el agua subterránea y la conduce hacia el sudoeste, lo que coincide con la información geológica de superficie. Sin embargo, los problemas de accesibilidad limitaron la amplitud del programa, y éste no aporta datos esenciales sobre la morfología del fondo del valle fósil en la zona más crítica, que es aquella en la que se ha proyectado la galería (Figura 4). Esta limitación de la información se traduce en que, con los mismos datos geofísicos, el Burgeap ha presentado dos trazas diferentes para el valle fósil (en 1986 y en 1991, ver Figura 6).



-  forage proposé dans ce rapport
-  galerie projetée
-  sondage électrique
-  forage sans essai du pompage
-  forage avec essai du pompage (327,240,243,246,247)
-  limite du bassin
-  alluvions actuels
-  coulées MPA (aquifère principal)
-  alluvions anciennes (impermeables)
-  substratum imperméable ou a très basse perméabilité

Fig. 4 -- Position des forages et sondages électriques en relation avec la galerie projetée.

IV.3.-Información procedente de los sondeos mecánicos

Durante el estudio de factibilidad (R.666/E.1718/1986) fueron realizados 11 sondeos con profundidades comprendidas entre 81 y 203.5 metros; más tarde, cuando fue construida la pista de la Ribeira Santa Clara, se perforó un sondeo complementario de 30 metros (FBE 139) en el mismo cauce de la Ribeira (Figura 4).

Los sondeos sirvieron para establecer las estructuras geológicas e hidrogeológicas generales de la cuenca, para conocer el espesor y la distribución en el subsuelo de las diversas unidades y para determinar el papel hidrogeológico de estas últimas. Han confirmado que los materiales más permeables son las coladas recientes de la MPA, mientras que las unidades F1 y PAi se comportan como substrato impermeable.

Comentario:

Las mismas observaciones que se han hecho para la campaña de prospección geofísica son válidas para la campaña de sondeos: los problemas de accesibilidad condicionaron los emplazamientos de las perforaciones, que no pudieron realizarse en el área de la galería propuesta sino en zonas marginales de la cuenca (fuera del eje del paleovalle).

La información más valiosa procede del último realizado (FBE 139), cuya ejecución sólo fue posible cuando fue construida la pista de la Ribeira Santa Clara. El sondeo, efectuado en el cauce del valle actual, intersectó el substrato impermeable (F1) a tan sólo 18 metros de profundidad, sin encontrar el acuífero (seco); con ello quedaba invalidada la hipótesis de trabajo del primer informe de factibilidad (1986), que situaba cerca del sondeo el eje del valle fósil que supuestamente canaliza el agua subterránea (ver Figura 6). Tal vez por esta razón, aunque no se menciona expresamente, el informe de 1991 (90-20;45/CV) traslada el eje del valle más al norte. Sobre este punto se insiste en el apartado IV.5.

IV.4.- Información procedente de los manantiales

El inventario de puntos de agua de superficie ha sido elaborado a lo largo de muchos años y las medidas de caudal se han mejorado con el tiempo, lo que explica las discrepancias existentes entre el inventario de 1983 (Rapport R.548/E.1397/11-83) y los datos de 1991 (Rapport 90-20;45/CV;1991). Entre ambos períodos hay coincidencia en los valores de caudal de las fuentes situadas en la cabecera de la cuenca (unos 200 m³/día), mientras que en aquellas situadas en la Ribeira de Santa Clara cerca de Achada Saco (565-568-569-570), el caudal pasa de 123 m³/día a 471 m³/día como suma total. La diferencia no puede obedecer a un aumento de la pluviometría, puesto que se mantienen los caudales de la cuenca alta, sino más bien a una mayor exactitud en los aforos como resultado de la mejora en las comunicaciones con la pista de la Ribeira Santa Clara, que llega muy cerca de este grupo de fuentes.

En la presente misión se ha prestado una atención particular al contexto geológico en que surgen los manantiales (Figura 5). De ésta forma hemos distinguido tres grupos:

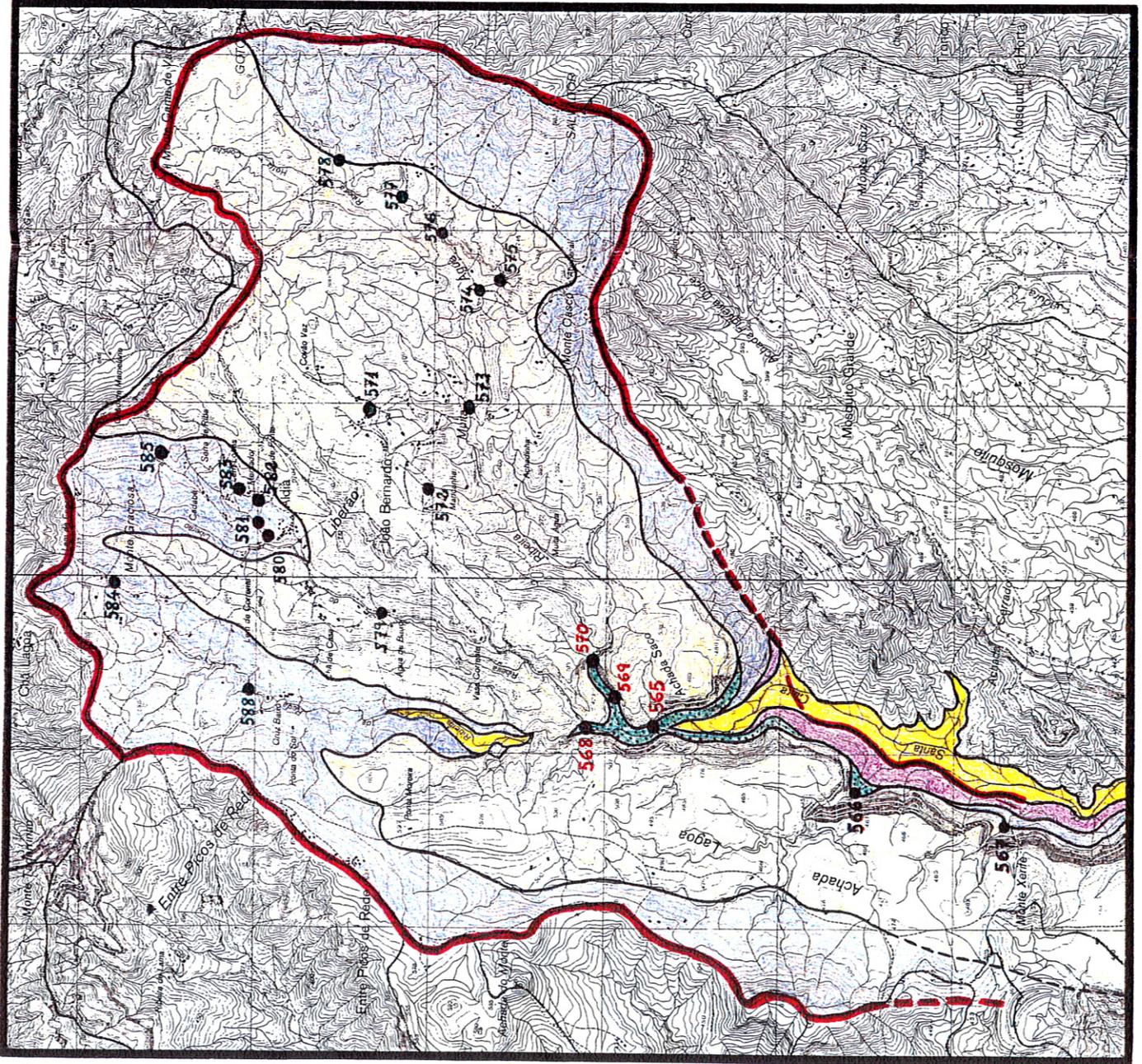
- 1.- Sources hautes. Se emplazan en la zona de mayor pluviometría (cabecera de la cuenca) y, aunque son muy numerosas, el caudal individual es escaso. En conjunto

proporcionan unos 200 m³/día, que son utilizados por la población del sector, si bien cabe la posibilidad de que el agua sobrante se infiltre de nuevo y vaya a salir por fuentes más bajas.

2.- Grupo de Achada Saco. Este grupo de cuatro fuentes (565-568-569-570) es el que proporciona mayor caudal (471 m³/día) y el que da una información más significativa sobre el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca. Todas las fuentes se sitúan en o cerca del contacto entre las lavas permeables MPA y los aluviones pre-MPA (impermeables) que rellenan el valle fósil. La surgencia de agua en cantidad tan considerable es debida a que el paquete de lavas MPA, que canaliza en dirección SW el agua recogida en la cabecera de la cuenca, ha sido cortado en todo su espesor por la actual Ribeira Santa Clara y su prolongación (Ribeira da Rede).

3.- Sources de Achada Lagoa. En la práctica se trata de una sola fuente (566, 66 m³/día), ya que la otra tiene un caudal insignificante. Esta fuente se encuentra en un contexto geológico idéntico al del Grupo de Achada Saco: las surgencias se producen en un horizonte de piroclastos y en una lava situados en la zona de tránsito entre el paquete principal de coladas MPA y los aluviones impermeables infrayacentes. Ambas formaciones rellenan

el valle fósil de Achada Lagoa (continuación más estrecha del de Achada Saco), el cual ha sido cortado parcialmente en su flanco por un afluente de la Ribeira de Santa Clara. La procedencia más probable de estas aguas es la infiltración que se producen en Achada Lagoa.



574 SOURCES HAUTES

Debit total inventaire 1983: 204 m³/jour
 " " rapport 1991: 207 "

565 SOURCES PRES ACHADA SACO

Debit total inventaire 1983: 123 m³/jour
 " " rapport 1991: 471 "

566 SOURCES ACHADA LAGOA

Debit total inventaire 1983: -----
 " " rapport 1991: 67 m³/jour

limite du bassin

alluvions actuels

coulées MPA (permeables)

alluvions anciennes (impermeables)

substratum imperméable ou a tres basse permeabilité

Fig. 5 -- Localisation des principales sources dans leur contexte géologique.

IV.5.- Morfología y relleno del valle fósil

En el esquema hidrogeológico del Burgeap, la galería de Muita Agua tiene que drenar el agua subterránea que circula por el fondo de un valle fósil relleno con materiales permeables. Los dos puntos cruciales en que concentrar la atención son, por tanto:

- 1.- La configuración oculta del valle fósil y, en especial, la posición del eje o cauce, el cual actúa como "chenal acuífero" en la hipótesis del Burgeap.
- 2.- La naturaleza del relleno y su comportamiento hidrogeológico.

Sobre el primer punto hay cierta confusión en los informes del Burgeap:

- El primer informe de factibilidad de la galería de Muita Agua (R.666/E.1718/1986) señala que el "chenal acuífero" se encuentra en la base de las coladas MPA, es decir, bajo Achada Saco (ver figuras 1 y 6). Como la información procedente de la geofísica y de los sondeos no parecía suficiente, se recomendó efectuar 3 o 4 sondeos en la Ribeira Santa Clara a fin de precisar con más exactitud la posición del "chenal acuífero".
- La perforación de uno de los sondeos recomendados (FBE 139, Figura 6) puso de manifiesto la no existencia del

"chenal acuífero" en el lugar previsto, ya que el substratum impermeable fue intersectado a tan sólo 18 metros bajo la Ribeira Santa Clara y, además, no se encontró agua.

- En el último informe sobre Muita Agua (90-20;45/CV;1991) se modifica la configuración del valle fósil (ver Figuras 2 y 6) sin justificar las razones del cambio y, aparentemente, sin haber realizado estudios adicionales.

Para tratar de resolver ésta incertidumbre, en la presente misión se ha concedido atención particular al reconocimiento de todos los aspectos geológicos e hidrogeológicos que, en relación con el valle fósil, es posible observar en superficie. Los resultados obtenidos pueden ser esquematizados de la siguiente manera:

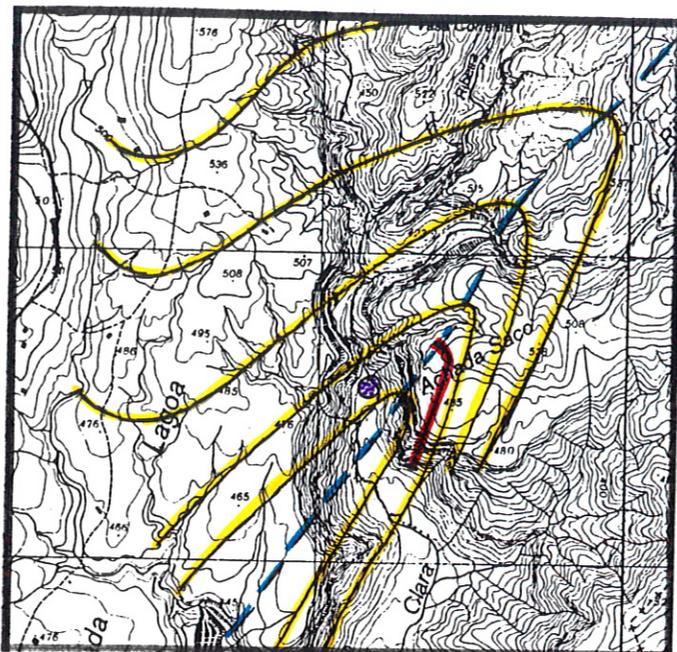
- 1.- Tal como postula el Burgeap, la cuenca de Muita tiene forma de "gouttiere" y desemboca hacia el SW mediante un valle fósil excavado en un substrato de permeabilidad nula o muy baja, constituido por las formaciones Fl, PAi y tal vez PA. El estrechamiento en "gouttiere" queda reflejado en superficie por la forma del contacto geológico de la unidad MPA (Figura 3).
- 2.- La topografía del substrato que limita el valle fósil, al menos en su mitad meridional, es perfectamente vi-

sible en el terreno debido al profundo corte que ha excavado la Ribeira Santa Clara (ver Fotos 5 y 6). Esta topografía coincide con la propuesta por el Burgeap en 1986 y no con la de 1991.

- 3.- En el terreno también es posible observar el tipo de material que rellena el valle fósil, que en todos los informes del Burgeap viene definido de una forma muy genérica ("coulées MPA", "coulées recientes permeables", etc.). En realidad, el fondo del valle está ocupado por aluviones antiguos en un espesor que supera los 50 metros, y las lavas MPA sólo constituyen la parte superior del relleno (ver Fotos 5 y 6).
- 4.- La repetida idea de que el fondo del valle fósil es un "chenal acuífero" no se corresponde ni con lo observable en el terreno ni con los resultados del sondeo FBE 139. Los aluviones antiguos tienen una matriz limo - arcillosa que les priva de permeabilidad (Foto 7); este comportamiento ha sido reconocido de forma genérica por el Burgeap en otros informes, en donde ha subrayado que la circulación del agua subterránea no se produce nunca en el interior de los aluviones antiguos (R.5487/E.1397/83, página 5).
- 5.- Otra línea de evidencia que confirma lo anterior es el contexto geológico de las fuentes más caudalosas de la cuenca, que se encuentran siempre en (o cerca de) el

contacto entre los aluviones antiguos y las lavas MPA. Esto sugiere que la circulación del agua subterránea se verifica en la base del paquete de lavas MPA y no en el fondo del valle fósil (ver Figura 7).

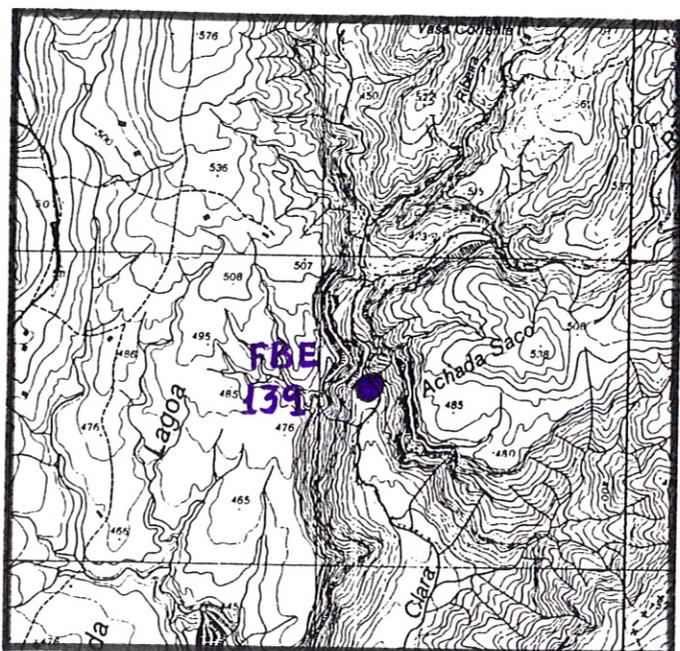
- 6.- La conclusión inevitable es que, con las evidencias disponibles, no hay ninguna razón para suponer que la galería proyectada en Muita Agua vaya a encontrar materiales distintos a los que se observan en superficie ni que, además, resulten permeables. Por el contrario, lo más probable es que la perforación atravesase un primer tramo de aluviones antiguos y, a continuación, entre definitivamente en el substrato impermeable general, sin alumbrar nada de agua o haciéndolo en cantidad insignificante (Figura 7).
- 7.- Caso de que existan dudas sobre la conclusión 6, sería aconsejable realizar un sondeo exploratorio de sólo 50 - 60 metros en el lugar en que el Burgeap supone que se encuentra el "chenal acuífero" (Figura 4). Las condiciones de acceso no son buenas por la pista de la Ribeira Santa Clara, pero el punto de perforación resulta más accesible entrando por la Ribeira da Rede desde la localidad de Entre Picos de Rede (ver Foto 11).



1986

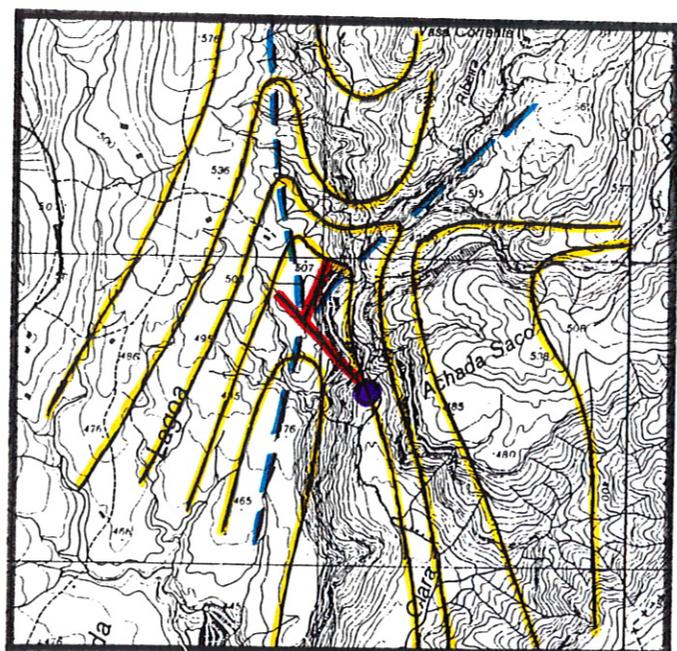
Avec l'étude géologique de surface et les données géophysiques et des forages, le Burgeap postule l'existence d'une vallée fossile creusée dans le substratum peu perméable (Fl, PAi), sous Achada Saco. Le fond de la vallée fossile, comblée par des épanchements volcaniques plus récents (coulées MPA), serait un chenal aquifère conduisant les eaux souterraines vers le Sud-Ouest. Le débit qui transite à la base du MPA pourrait être capté par une galerie (en rouge). Le passage sous les alluvions de la Ribeira Santa Clara devrait être précisé par des forages, encore réalisés faute d'accès.

(Rapport Burgeap R.666/E.1718/1986)



1987-1990

Construction de la piste d'accès et réalisation du forage FBE 139. On ne trouve pas de l'eau et on entre dans la Formation Flamengos (substratum imperméable général) après 18 mètres de perforation. Ces résultats invalident l'hypothèse de 1986.

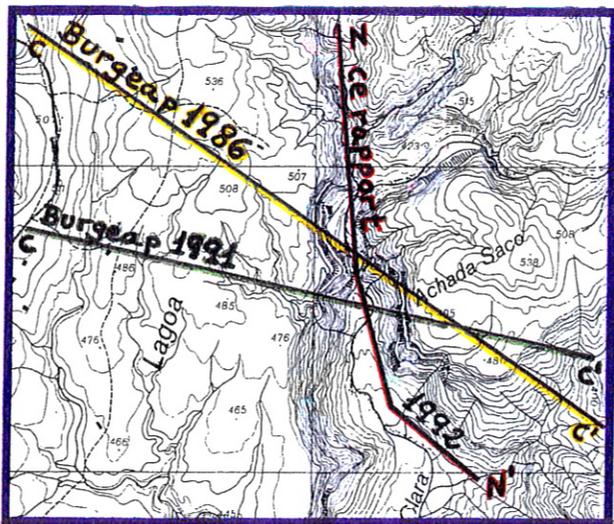


1991

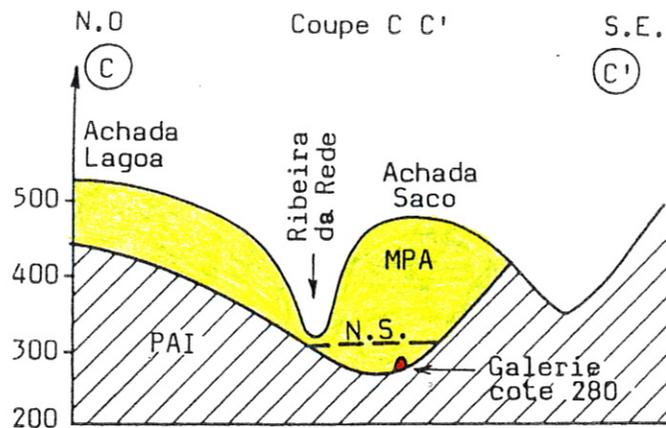
Avec le résultat du forage FBE 139, et sans nouvelle information géophysique ou d'autres forages, on déplace plus au Nord l'axe de la vallée fossile maintenant l'idée d'un chenal aquifère du fond. Conséquemment, on change aussi la position de la galerie proposée.

(Rapport Burgeap 90-20; 45/CV;1991)

Fig. 6 .- Changes de position de la galerie Muita Agua.

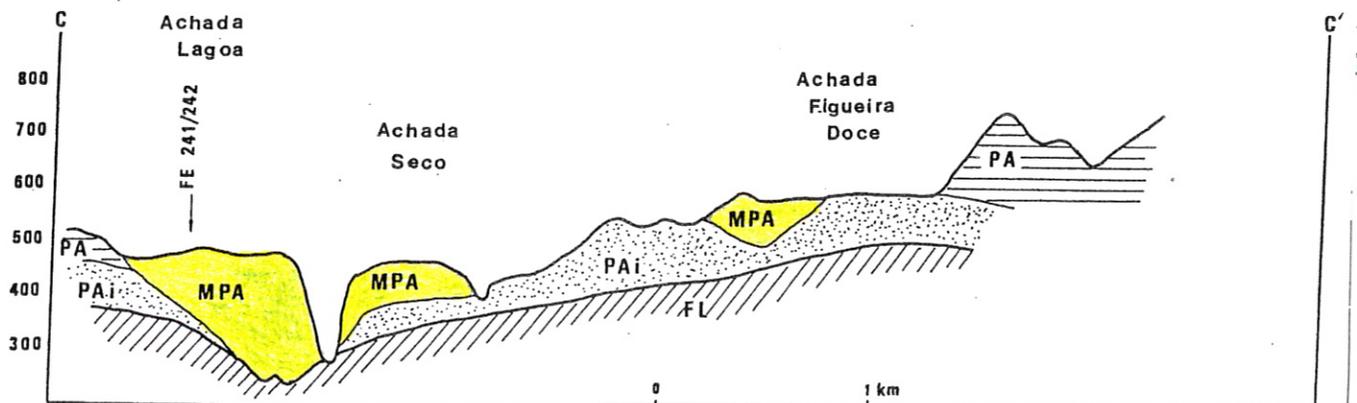


carte de situation

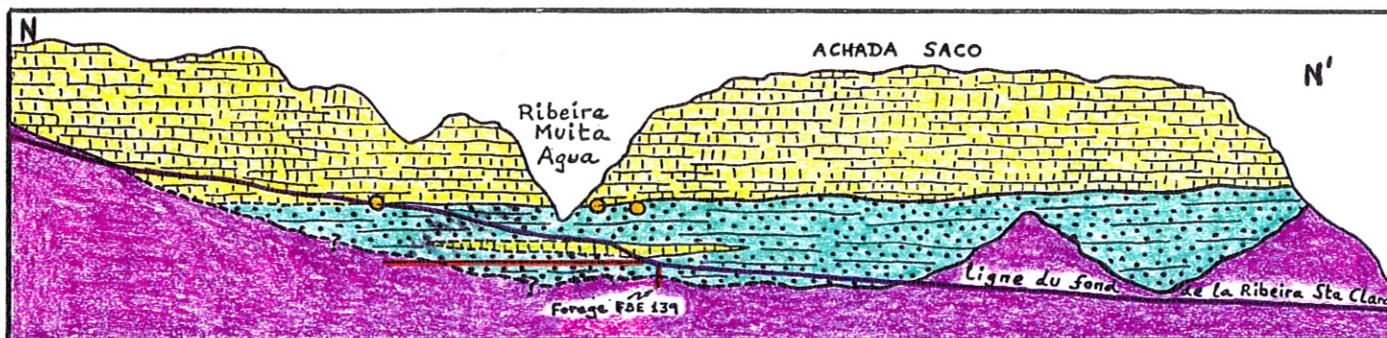


INTERPRETATION BURGEAP 1986

COUPE CC'



INTERPRETATION BURGEAP 1991



substratum imperméable
 alluvions anciennes (impermeables)
 coulées récentes MPA (permeables)

| forage

— galerie Muita Agua (projet Burgeap)

● source

INTERPRETATION CE RAPPORT (1992)

Fig. 7.- Vallée fossile de Muita Agua d'après les différents rapports. Dans ce rapport, la configuration topographique de la vallée est similaire à celle du Burgeap 1986, mais la nature du remplissage diffère de tout: alluvions anciennes pas perméables contre coulées perméables. Conséquemment, il n'y a pas de chenal aquifère au fond mais l'écoulement au contact entre les laves MPA et les alluvions anciennes. Avec cette interprétation, la galerie proposée ne trouvera pas d'eau.

IV.6.-Cálculo de los caudales de circulación

El caudal captable por la galería proyectada es una fracción del volúmen anual de agua que circula por el valle fósil de Muita Agua. Este volúmen ha sido calculado por el Burgeap con dos métodos diferentes: 1) a partir del balance hídrico (caudal circulante = infiltración = lluvia - evaporación - escorrentía), y 2) a partir de los ensayos de bombeo efectuados en algunos sondeos.

IV.6.1.- Metodo del balance hídrico

Este procedimiento parte de la pluviometría registrada durante un lapso de 30 años (1953 -1982), cuyos valores se dividen en dos períodos: Pluviometría alta (1953 -1967) y Pluviometría baja (1968-1982). A partir de la pluviometría se determina el "exces d'eau" (pluviometría eficaz) mediante la formula de TURC, y éste valor se divide en infiltración y escorrentía. Para averiguar cuanta agua se infiltra, el Burgeap ha tenido en cuenta la naturaleza y la pendiente de los terrenos, asignando los siguientes valores:

<u>Zonas</u>	<u>Pendiente</u>	<u>Coefficiente de infiltración</u>
Achadas	< 20%	50%
Versants bas	20 - 40%	25%
Versants hauts	> 40%	15%
Cones de scories	30 - 50%	40%

Estos coeficientes han sido deducidos de cuencas piloto (bassin de calage) en las que, por razones geológicas, toda el agua infiltrada sale por nacientes situados en la parte baja de la cuenca.

Con este metodo, el balance de Muita Agua es el siguiente (Rapport Burgeap R.666/E.1718/1986):

BASSIN MUITA AGUA (superficie 13,8 km²)

	DEBIT MOYEN 1953 -1982		DEBIT SECHE 1968 - 1982	
	Total bassin (m3/día)	Captable por galería (m3/día)	Total bassin (m3/día)	Captable por galería (m3/día)
Exces d'eau (Pluv)	7.940	6.840	4.760	
Total ruisselé (Esc)	-5.780	-4.980	3.468	
Total infiltré (Inf)	2.160	1.860	1.296	1.120
Sources (Nacientes)	- 560	- 560	- 340	- 340
Excedent disponible (Caudal disponible)	1.600	1.300	960	780

Esto significa que, según los cálculos, el caudal de agua subterránea que circula por la cuenca oscila entre 1.600 m³/día (períodos de pluviometría media) y 960 m³/día (períodos de sequía). De este caudal, lo que puede ser recuperado por la galería es:

Debit minimum hautement probable800 m³/día
Debit moyen probable1.000 m³/día
Debit maximun possible1.200 m³/día

Comentario

Los valores de infiltración obtenidos a partir del balance hídrico tienen numerosas incertidumbres porque, a excepción de la pluviometría, que se mide directamente con una red adecuada de estaciones, las restantes variables (evapotranspiración y escorrentía) deben ser derivadas de fórmulas empíricas que, como la de Turc, no siempre han sido establecidas en el mismo tipo de ambiente que el de la zona de aplicación.

Consciente de ello, el Burgeap ha buscado una aproximación más pragmática y directa, basada en la existencia de "bassins de calage" bien conocidas, en las que toda el agua que se infiltra vuelve a salir a la superficie en forma de fuentes, sin que se produzcan pérdidas al mar. Esto significa que, si se

conoce 1) la pluviometría media anual, 2) la superficie de la cuenca, y 3) el caudal medio de los nacientes, es posible calcular el coeficiente de infiltración, es decir, el porcentaje de agua que se infiltra con relación al volumen total de lluvia precipitada en la cuenca. Por otra parte, los coeficientes de infiltración hallados podrán ser aplicados a cuencas próximas de características similares en cuanto a morfología y naturaleza de los terrenos.

Siguiendo este método, en las tres "bassin de calage" establecidas por el Burgeap (San Joao, Santa Ana y San Jorge) hemos aplicado los siguientes parámetros: 1) la pluviometría media obtenida con los datos de isoyetas más recientes (JRH-PNUD, 1992, Figura 8), 2) la superficie de la cuenca dada por el Burgeap (Rapport R.548/E.1397/83), y 3) el caudal de los nacientes (Burgeap 1991). Los resultados son los siguientes:

Bassin de calage de San Joao

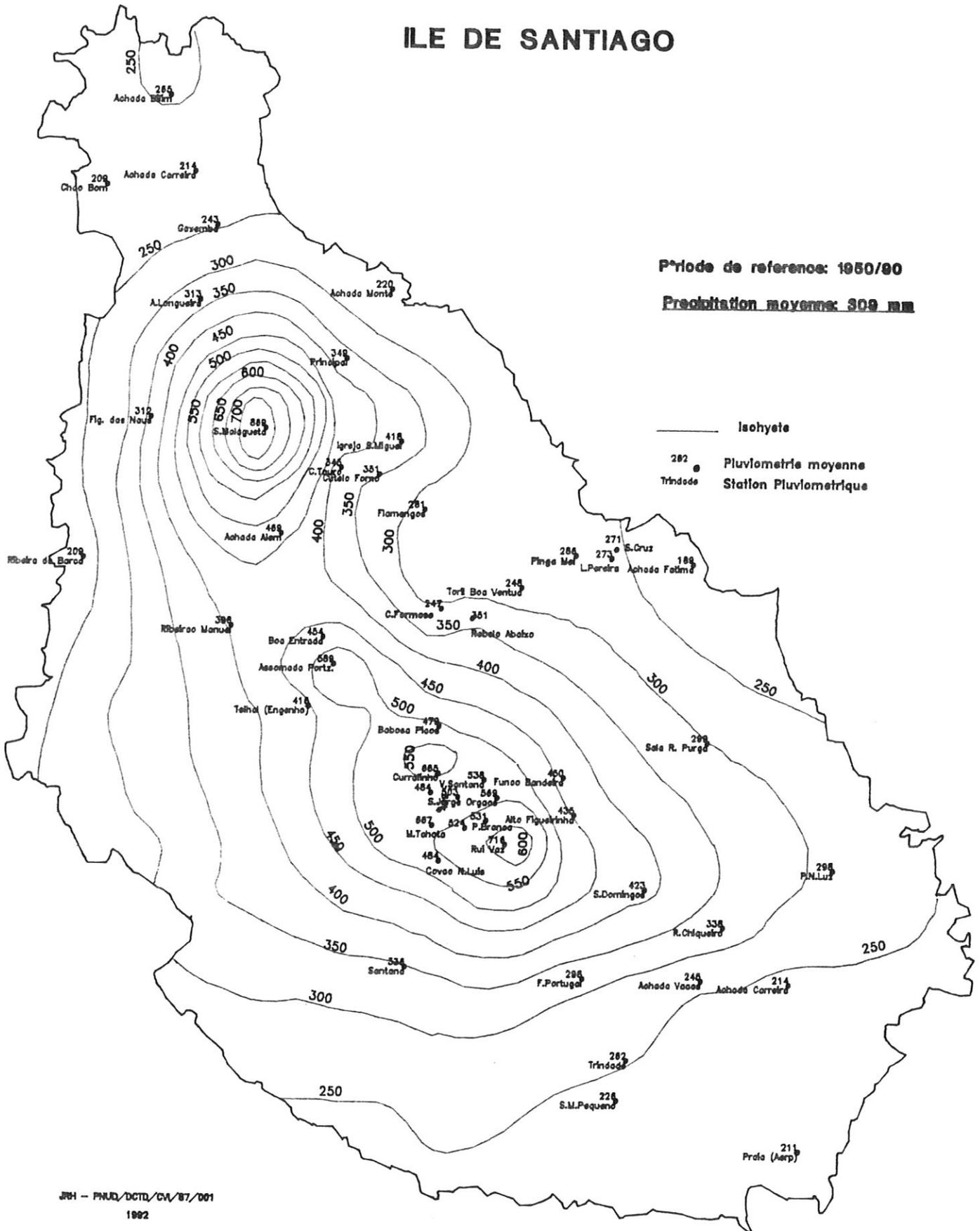
Pluviometría media anual = 350	l/m^2	> Pluviometría total= 875.000 $m^3/año$ => Coef. infiltración = 4,2%
Superficie de la cuenca = 2,5	km^2	
Caudal de nacientes = 103	$m^3/día$	

Bassin de calage de Santa Ana

Pluviometría media anual = 350	l/m^2	> Pluviometría total= 2.130.000 $m^3/año$ => Coef. infiltración = 7,5%
Superficie de la cuenca = 6,1	km^2	
Caudal de nacientes = 440	$m^3/día$	

ISOHYETES INTERANNUELLES

ILE DE SANTIAGO



JRH - PHUD/DCTD/CVA/87/001
1982

ESCALA: 1/150.000
SUPERFICIE: 502 Km²

Fig. 8.-

Bassin de calage de San Jorge

$$\begin{array}{l} \text{Pluviometría media anual} = 350 \text{ l/m}^2 \\ \text{Superficie de la cuenca} = 2,8 \text{ Km}^2 \\ \text{Caudal de nacientes} = 90 \text{ m}^3/\text{día} \end{array} \left\| \right. \begin{array}{l} > \text{Pluviometría total} = 980.000 \text{ m}^3/\text{año} \\ \implies \text{Coef. infiltración} = 3,3\% \end{array}$$

Los coeficientes de infiltración obtenidos oscilan aproximadamente entre el 4% y el 7%, lo cual parece ser un reflejo de las diferencias que hay entre una cuenca y otra en lo que se refiere a morfología, naturaleza de los terrenos, etc. Con estos valores de partida se puede intentar abordar el cálculo del agua subterránea que circula en la cuenca de Muita Agua:

De acuerdo con el plano de isoyetas, la pluviometría media de la cuenca de Muita Agua es de 400 l/m². Según Burgeap la superficie de la cuenca es 13,8 km² y el caudal disponible (infiltración) que obtiene con el método del balance hídrico es de 2.160 m³/día para el período medio y 1.296 m³/día para el período seco. Con estos valores se puede obtener el valor del coeficiente de infiltración resultante. Este será:

$$Q \text{ (disponible)} = C_{\text{inf}} \times P_m \times S \implies C_{\text{inf}} = \frac{Q \text{ (disponible)}}{P_m \times S}$$

que con los valores mencionados será:

$$C_{\text{inf1}} = \frac{2.160}{400 \times 13,8} \times 365 \times 10^{-3} \implies C_{\text{inf1}} = 14,3\%$$

$$C_{\text{inf2}} = \frac{1.296}{400 \times 13,8} \times 365 \times 10^{-3} \implies C_{\text{inf2}} = 8,5\%$$

Quizás había que subir el valor de P_m para el cálculo de C_{inf1} , al tratarse del período medio y no del seco. No obstante, aumentando P_m a 600 l/m^2 se obtiene un valor de C_{inf} del 10%.

Los resultados obtenidos indican que el caudal disponible que usa Burgeap para determinar el caudal captable por la galería de Muita Agua, corresponden a valores del coeficiente de infiltración que oscilan entre el 8 y el 14% en vez del que se obtiene en las "bassin de calage".

Este aumento sólo tiene justificación si el porcentaje de achadas y conos de escorias que existen en la cuenca de Muita Agua son mayores que los existentes en las "bassin de calage". (Recuérdese que el mayor coeficiente de infiltración corresponde a estos dos accidentes morfológicos).

De la observación en el campo, e incluso en el mismo plano geomorfológico de cuenca a escala 1/25.000 (Burgeap, febrero 1986), se indica que la cuenca de Muita Agua, aguas arriba de la ubicación de la galería, no presenta achadas en porcentaje significativo. Unicamente existe una superficie apreciable de escorias y lapillis ($I= 40\%$) pero que están incluidas dentro de la Serie PAi (plano geológico de Burgeap, julio 1991) con lo que la infiltración debe ser mucho menor que la teórica asignada. Es más el relieve está constituido en su mayor proporción por una

marcada red de drenaje donde prácticamente la mayoría del relieve está formado por cuencas con pendientes muy pronunciadas, correspondiéndoles según Burgeap valores de la infiltración muy pequeños.

Por todo lo expuesto se concluye que: el coeficiente de infiltración que se deduce del balance hídrico usado por Burgeap en Muita Agua, es del orden del doble del que el mismo Burgeap obtiene para las "bassin de calage", sin que exista ninguna justificación de tipo geomorfológico que avale este aumento. Al estar mayorado el coeficiente de infiltración, obtiene Burgeap un caudal disponible y con él un caudal captable superior al real.

Pero no toda la mayoración acaba aquí; al caudal disponible, Burgeap le resta el caudal de los manantiales (sources) que de forma natural salen de la cuenca subterránea, pero el caudal que usa es de $340 \text{ m}^3/\text{día}$ para el año seco, sin embargo en el informe: "Ressources en eau captables a partir de la ribeira de Santa Clara". Burgeap 90-20 45/Cv juillet 1991", y en el "tableau 3. Description des Sources du Bassin de Muita Agua" se indica que un valor mínimo de este caudal de manantiales es de $745 \text{ m}^3/\text{año}$. De todos estos nacientes algunos puede que vuelvan a infiltrarse, pero lo que no cabe duda es que los naciente numerados y aforados por Burgeap como: 565, 568, 569 y 570 con un caudal medio de conjunto de $471 \text{ m}^3/\text{día}$, descargan en la ribeira y

se pierden por el aluvial. El aforo de estos nacientes se ha contrastado con el control de caudales que dispone la Junta do Recursos Hídricos de Praia. Por tanto los valores de caudales que debería indicar el informe de 1991 deberían haber sido de:

Caudal disponible = $1.296 - 471 = 825 \text{ m}^3/\text{día}$

en vez de los $960 \text{ m}^3/\text{día}$ calculados. El caudal captable por la galería de Muita Agua debería haber sido de:

Caudal captable = $0,81 \times \text{Caudal disponible} = 670 \text{ m}^3/\text{día}$

en vez de los $800 \text{ m}^3/\text{día}$ que define como producción de la futura galería.

En resumen el cálculo del caudal captable por la galería definido por Burgeap, presenta una doble sobrevaloración. Por un lado se aumenta el caudal infiltrado y por otro se disminuye el caudal que actualmente se drena del acuífero por los nacientes.

CALCULO DE LOS MAXIMOS CAUDALES DISPONIBLES Y CAPTABLES DE AGUA SUBTERRANEA EN LA CUENCA DE MUITA AGUA REALIZADO POR NOSOTROS A PARTIR DE LOS DATOS DE BURGEAP

Para calcular el caudal de infiltración de la cuenca subterránea de Muita Agua, hay que tener en cuenta que la cuenca superficial está formada por terrenos pertenecientes a la Serie MPA y PAi que presentan una permeabilidad muy diferente. A efectos del cálculo se asigna el máximo valor del coeficiente de infiltración (7%) a los terrenos pertenecientes a MPA y el mínimo (4%) a los de la serie PAi. Los cálculos son:

Superficie total de la cuenca de Muita Agua= $13,8 \text{ km}^2$

Superficie de la cuenca donde aflora la serie MPA= $8,7 \text{ km}^2$ ($C_{\text{infl.}} = 7\%$)

Superficie de la cuenca donde aflora la serie PAi= $5,1 \text{ km}^2$ ($C_{\text{infl.}} = 4\%$)

Pluviometría media anual= 400 l/m^2

Pluviometría total= $3.480.000 + 2.040.000 \text{ (hm}^3/\text{año)}$

De este volúmen de agua de lluvia se infiltra, según hemos visto, entre un 4 y un 7%. Por tanto el caudal de circulación de las aguas subterráneas de Muita Agua son:

$$Q(\text{infiltr}) = 0,07 \times 3,48 + 0,04 \times 2,04 = 0,3252 \text{ hm}^3/\text{año} = 890 \text{ m}^3/\text{día}$$

Una vez obtenido este caudal de infiltración, el caudal

disponible resulta de descontarle a éste el caudal de los nacientes de la cuenca de Muita Agua que surgen de forma natural en la Ribera de Santa Clara. Hemos vistos que este caudal puede oscilar entre 540 y 745 m³/día; de ambos valores el máximo caudal disponible se obtiene al considerar 540 m³/día.

Por tanto los caudales infiltrados y disponibles son:

$$\text{Caudal infiltrado} = 890 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Caudal disponible} = 890 - 471 = 420 \text{ m}^3/\text{día}$$

El caudal captable resulta de multiplicar el caudal disponible por un cierto coeficiente, que en los cálculos de Burgeap oscila entre un 75 y un 83 %.

$$Q(\text{captable}) = 0,83 \times 420 \approx 350 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por tanto según el método del balance hídrico; desarrollado a partir del cálculo del coeficiente de infiltración, deducido de las cuencas del "calage"; se obtiene que el caudal teórico máximo captable por la galería es de 350 m³/día.

IV.6.2.- Metodo de los ensayos de bombeo

Burgeap realizó varios ensayos de bombeos en los sondeos situados en la cuenca de Muita Agua; de los cuales, sólo se dispuso de la información de tres de ellos, extraídos de los archivos de la Junta do Recursos Hidricos de Praia. Los 3 sondeos son:

Sondeo 246 cota 500 m. Comienzo de la perforación el 31/10/83, finalizado el 8/11/83, profundidad 90m, nivel estático después de la perforación a 33,88 metros. Desde la boca del sondeo hasta los 62 metros se atraviesan coladas de basalto correspondientes a la serie MPA (Serie Pico Antonia Superior). De 62 a 72 metros se perfora PAi (Pico Antonia inferior) y de 72 a 90 m terreno correspondiente a la formación de Flamengos.

Sondeo 247 cota 520 m. Comienzo de la perforación el 08/11/83 y acabado el 14/11/83, profundidad 90,56 m, nivel estático a 4,46 m de la boca. Desde la superficie hasta los 55,10 metros se perfora la Serie MPA. Desde 55,10 a 58,05 la Serie PA y desde 58,05 hasta 90,56 la Serie Flamengos.

Sondeo 248 cota 505 m. Comienzo de la perforación el 18/11/83 y acabado el 24/11/83, profundidad total 108,50 m, nivel estático a 39,50 metros de la boca. Los 44 primeros metros perforados corresponden a la Serie MPA, desde 44 a 60 m a PAi y de 60 a 108,5 m se perfora la Serie Flamengos.

Distancia entre 246 y 247 = 1 km

Distancia entre 246 y 248 = 0,8 km

Distancia entre 248 y 247 = 1 Km

En el sondeo 246 se efectuaron 3 ensayos de bombeo, uno escalonado y dos con caudal constante. En el sondeo 247 se realizó un ensayo de bombeo a caudal constante. Por último en el sondeo 248 se efectuó un ensayo de "air lifts". Exceptuando este último, en los demás se toman las medidas de nivel y caudal con una precisión digna de alabanza por su fiabilidad y precisión. En el último y debido al procedimiento empleado para la extracción

de agua, sólo se mide la recuperación. Durante el último ensayo realizado en el sondeo 246, se mide el nivel en el 248 no observándose ningún descenso.

De forma resumida los resultados de los ensayos son:

Sondeo 246

Ensayo de bombeo escalonado fecha 15/11/83 nivel antes del bombeo 33,88 m.

Q= 2m³/hora durante 90 min. Desciende el nivel rápidamente y presenta una cierta estabilización a partir de los 10 minutos alrededor de 34,40. Al final alcanza la profundidad 34,42 m. Descenso de 0,54 m.

Q= 4m³/hora durante 60 min., nivel inicial 35,88. Al principio y debido a las variaciones del caudal de la bombas (4 a 5,5 m³/hora), el nivel oscila y llega a bajar hasta 37,10 m. A los 15 minutos se estabiliza en 35,35 durante 30 minutos, al final baja hasta 35,375 m. Descenso parcial de 1,45 m.

Q= 7,8m³/hora durante 60 minutos, nivel inicial 35,88. No se estabiliza y desciende hasta alcanzar los 38,105 m al final del bombeo. Descenso parcial de 2,22 metros.

El descenso total ha sido de 4,22 metros extrayendo 14,8 m³ de agua. La recuperación se inicia desde 38,105 y parece estabilizarse a los 70 minutos en 34,00 metros de profundidad. Recuperación total 4,105 m.

Ensayo de bombeo 18-19/11/83. Caudal constante de 8,2 m³/hora durante 24 horas.

Nivel al comenzar 33,88 m. A la media hora presenta un intento de estabilización en 38,09 durante 40 minutos, luego sigue el nivel de agua bajando hasta las 24 horas que alcanza 39,94. Durante este descenso el nivel baja de forma constante con el tiempo (véase figura). El descenso total ha sido de 6,06 metros con un volumen de agua extraído de 196,8 m³. La recuperación es rápida en los primeros instantes y a partir de los 10 minutos se vuelve más lenta. A las 9 horas había recuperado 5,11 metros.

Ensayo de bombeo 11-14/01/84. Caudal constante de 6,54 m³/hora durante 48 horas.

Nivel al comenzar 33,92. Desde que se inicia el bombeo comienza a bajar el nivel muy rápidamente. A partir de la media hora presenta ya un descenso constante en el tiempo (véase figura). Al final del bombeo alcanza los 38,55 metros que supone un descenso total de 4,63 metros con un volumen de agua extraída de 314 m³. La recuperación es muy rápida durante los 10 primeros minutos, disminuyendo luego progresivamente hasta las tres horas de terminado el bombeo. A partir de este momento y hasta 24 horas presenta una recuperación constante con el tiempo.

Sondeo 247

Ensayo de bombeo 23-24-25/11/83. Caudal constante de 12,86 m³/hora durante 31 horas y 40 minutos.

Nivel al comenzar 4,46 metros. Descenso rápido hasta los 100 minutos donde comienza a descender de forma constante con el tiempo. Al final del ensayo llega a 8,615 m. Descenso total de 4,15 metros con un

volúmen de extracción de 406 m³. La recuperación es muy rápida durante los 10 primeros minutos luego presenta una clara tendencia al equilibrio alrededor de los 5,90 metros, salta a equilibrarse a los 5,80 metros durante algo más de dos horas. A partir de ese momento sigue ascendiendo de forma constante con el tiempo durante 10 horas, después de esto sigue subiendo de forma constante pero con un valor más bajo hasta el final del ensayo. (Ver figura).

Sondeo 248 Nivel antes del ensayo 40,50 fecha 18/11/83.

Ensayo de bombeo con "air lifts". Se extrae un caudal medio de 784 l/hora durante 6 horas (volúmen 6.044 litros). Sólo se mide la recuperación. A los 3 minutos de parar el bombeo se toma la primera medida que es 64,90, a las 4 horas de recuperación alcanza 40,65 metros.

Con estos ensayos Burgeap obtiene los valores de las siguientes transmisividades:

Sondeo 246

Ensayo 18-19/11/83	Q= 8,2 m ³ /h.	T ₁ = 1,4 x 10 ⁻³ m ² /sg
		T ₂ = 2,7 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
		T ₃ = 1,12 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
	Recuperación	T ₄ = 1,7 x 10 ⁻³ m ² /sg
Ensayo 11-12-13/01/84	Q= 6,5 m ³ /h.	T ₁ = 7,9 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
		T ₂ = 1,9 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
		T ₃ = 9,6 x 10 ⁻⁵ m ² /sg
	Recuperación	T ₁ = 9,4 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
		T ₂ = 3,8 x 10 ⁻⁴ m ² /sg

Sondeo 247

Ensayo 23-24-25/11/83	Q= 12,86 m ³ /h.	T ₁ = 1 x 10 ⁻³ m ² /sg
		T ₂ = 4,2 x 10 ⁻⁴ m ² /sg
	Recuperación	T ₁ = 1,55 x 10 ⁻³ m ² /sg
		T ₂ = 8,7 x 10 ⁻⁴ m ² /sg

Comentario

Una vez obtenida la transmisividad y teniendo en cuenta el gradiente hidráulico y la potencia del acuífero, obtiene el Instituto Burgeap el caudal de circulación del agua subterránea.

Tal y como se explica en el apartado correspondiente, el acuífero ensayado, está limitado en su anchura por las márgenes del paleovalle. En profundidad, se trata de un acuífero estratificado por capas; donde las coladas se presentan con una permeabilidad alta y el antiguo aluvial (conglomerados) es prácticamente impermeable. Cuando un sondeo se perfora en un acuífero de este tipo, el agua se sitúa llenando todo el sondeo hasta alcanzar el nivel de la capa permeable más alta por donde circula el agua. Si este factor no se tiene en cuenta, la potencia del acuífero se verá aumentada. De acuerdo con el reconocimiento de campo, el espesor de conglomerados supera en mucho al espesor de coladas o piroclastos fracturados.

Pero además el valor de la transmisividad obtenida por los ensayos de bombeo está también sobrevalorada. Así es, si consideramos que el flujo de agua que circula por el acuífero puede definirse como un caudal por unidad de longitud en sentido perpendicular al eje del cauce; el caudal de agua subterránea que puede extraerse de un sondeo, será proporcional al radio de descensos del bombeo.

$$Q_{\text{cir}} = 2 R f \quad f = \text{flujo de circulación (m}^3/\text{día} \times \text{m)}$$

Si se efectuara el ensayo de bombeo con un caudal

inferior a Q_{cir} , el nivel de agua descenderá hasta que el radio de influencia sea capaz de obtener del flujo de circulación, el caudal que demanda el bombeo. A partir de este momento, se producirá el equilibrio del nivel de agua en el sondeo. Por el contrario, si el caudal de bombeo es superior al Q_{cir} , entonces el flujo de circulación no podrá nunca aportar ese caudal, por lo que el nivel de agua bajará de forma continua cediendo al bombeo aguas de reserva.

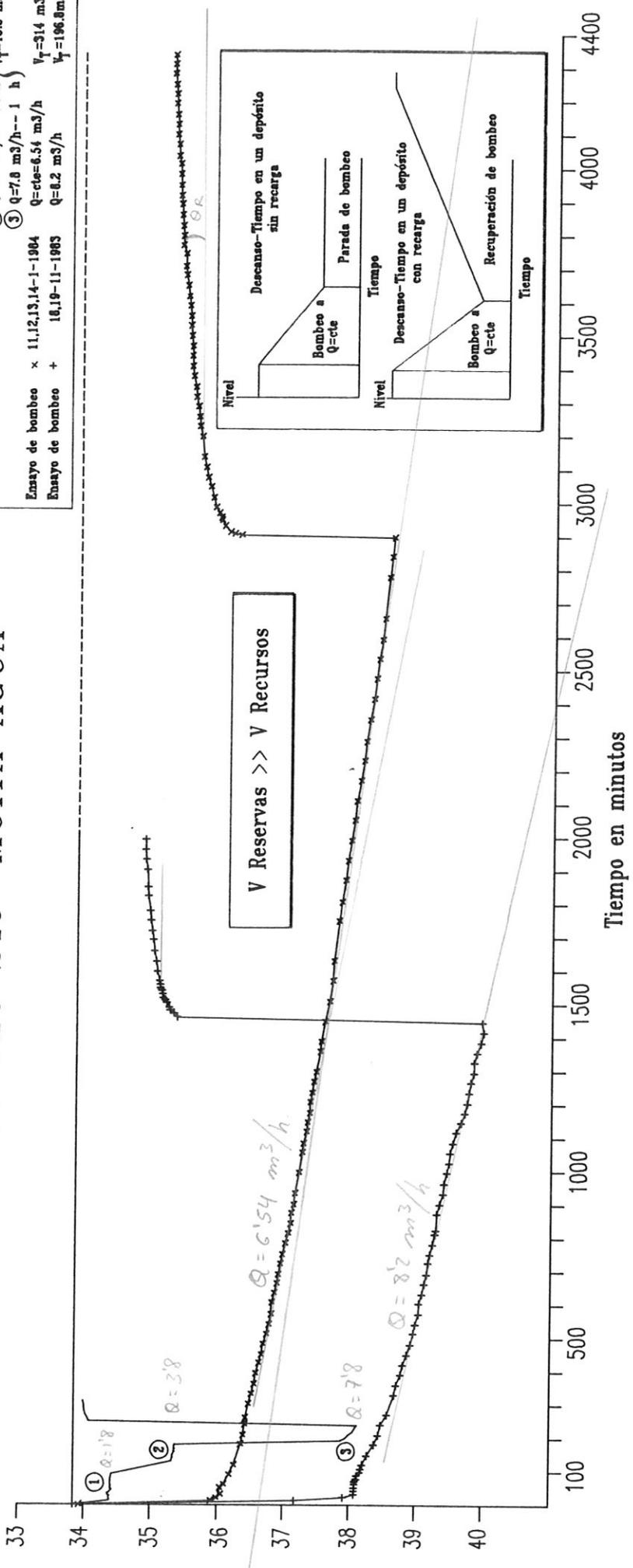
Por estos motivos la transmisividad hallada mediante un ensayo de bombeo sin que se estabilice el nivel, no es representativo del caudal de circulación. Este es el caso de la práctica totalidad de los ensayos de bombeo efectuados en los sondeos de Muita Agua. Exceptuando el ensayo escalonado realizado en el sondeo 246 en sus dos primeros escalones de caudal, el resto de los ensayos nunca alcanzan el nivel de equilibrio y lejos de ello la tendencia es a bajar linealmente con el tiempo, lo que indica que se está vaciando un depósito. De lo cual se deduce que el valor de la transmisividad está sobrevalorado (Ver gráfico del sondeo 246).

Luego en este método la transmisividad está aumentada, al no tener en cuenta este efecto de extracción de reservas; y la potencia del acuífero está también aumentada, al considerar la permeabilidad del paleoaluvial igual a las de las coladas. El resultado es un caudal de infiltración mucho mayor del real.

SONDEO 246 "MUITA AGUA"

Ensayo de bombeo	15-11-1985	① $Q=1.8 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 1.5 \text{ h}$ ② $Q=3.8 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 1.5 \text{ h}$ ③ $Q=7.8 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 1 \text{ h}$
		$V_T=15.3 \text{ m}^3$
Ensayo de bombeo	11.12.13.14-1-1984	$Q=cte=6.54 \text{ m}^3/\text{h}$ $V_T=314 \text{ m}^3$
Ensayo de bombeo	18.19-11-1983	$Q=8.2 \text{ m}^3/\text{h}$ $V_T=196.8 \text{ m}^3$

Profundidad en metros



Tiempo en minutos

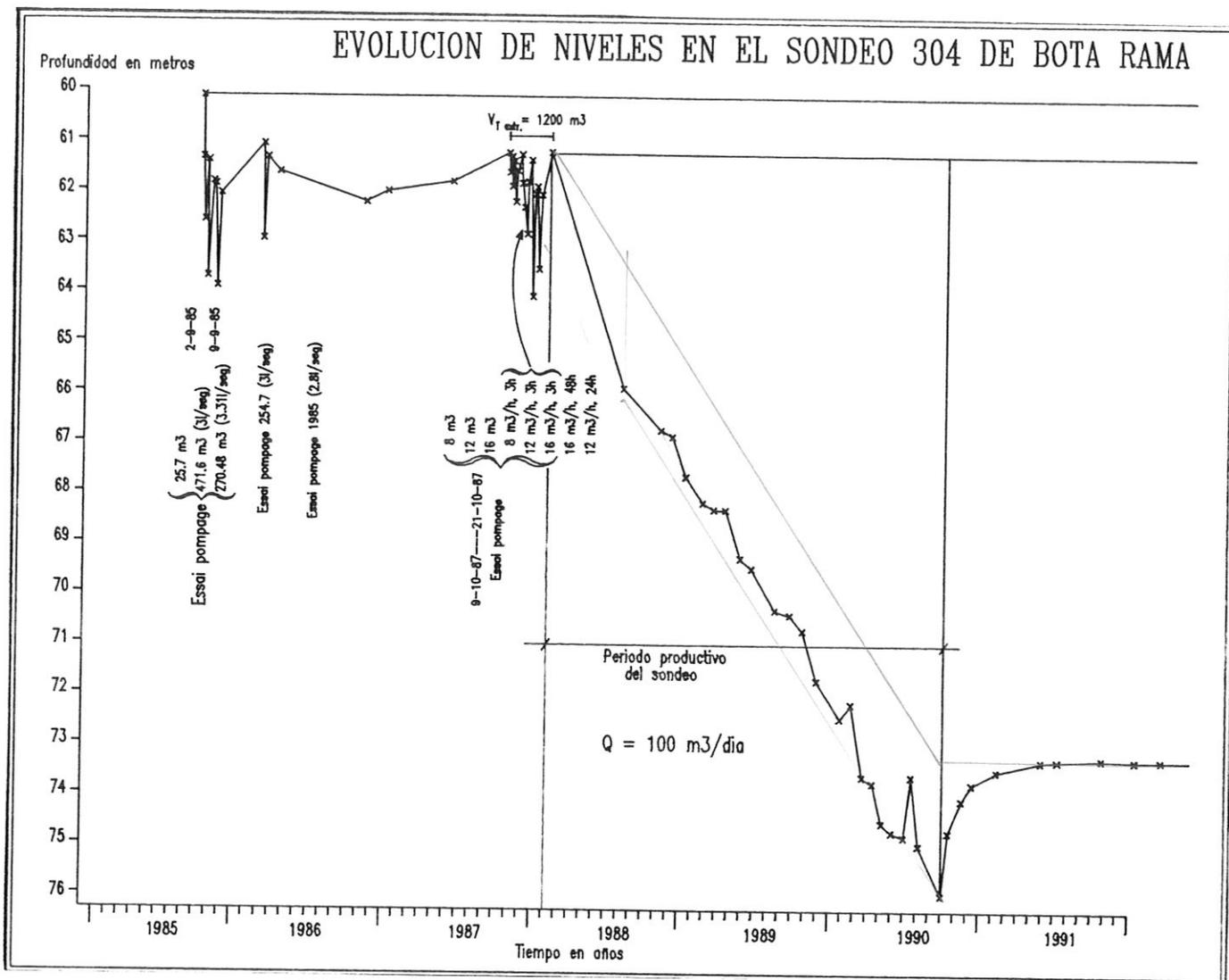
En el presente gráfico se representan todos los ensayos de bombeo realizados en el sondeo 246 de Muita Agua. En él puede observarse que excepto en los escalones 1 y 2, el resto de los ensayos no logran equilibrar el nivel de agua. Es más, lejos de conseguirlo, descienden de una forma lineal en el tiempo, lo que indica un efecto de "vacío de depósito". Al producirse este descenso lineal, el acuífero está indicando que se le está extrayendo aguas de reserva; lo cual queda también reflejado en el tramo de curva de la recuperación, al situarse lejos de la recuperación total del nivel inicial. Este tramo de la curva de recuperación, en su parte final, adquiere también una forma lineal con un ángulo muy tendido; lo cual da una idea de que el caudal de los recursos (caudal disponible o caudal que se renueva) es muy pequeño frente al caudal de bombeo. En la práctica y una vez vaciado el acuífero de aguas de reserva, el caudal que se dispondría sería únicamente este caudal de recursos. Los caudales correspondientes a los escalones 1 y 2, al presentar una tendencia en la estabilización, dan un orden de magnitud de este caudal de recursos, que es el caudal captable por el sondeo en relación al caudal disponible del acuífero.

CALCULO DE LOS CAUDALES DISPONIBLES Y CAPTABLES REALIZADOS POR NOSOTROS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO DE BURGEAP

Si un ensayo de bombeo refleja que el nivel desciende linealmente con el tiempo indica que estamos extrayendo aguas de reserva del acuífero. Estas extracciones de aguas de reserva provocan una depresión en torno al sondeo que se refleja en la recuperación, logrando alcanzar el primitivo nivel de agua después de un largo tiempo de recuperación. Este proceso, típico de los acuíferos volcánicos con volúmenes de infiltración pequeños, si sucede en un acuífero costero, genera el proceso de intrusión marina; mientras que si se produce en una zona del acuífero fuera de la influencia del mar, se genera un vaciado paulatino que repercute en un descenso del nivel freático (En la isla de Tenerife y Gran Canaria se han constatado descensos de esta índole que alcanzan los 500 metros). En algunos casos se puede constatar que este caudal de llenado (que coincide con el caudal disponible) es prácticamente nulo, en ciertas fechas de nula precipitación (Ver gráfico del sondeo 304 de Bota Rama).

Como el futuro de la galería radica en ese caudal de circulación disponible y no en el volumen de reservas, la rentabilidad de la captación estará en ese caudal.

EVOLUCION DE NIVELES EN EL SONDEO 304 DE BOTA RAMA



El gráfico que se adjunta indica la evolución de niveles en el sondeo 304 perteneciente al paleovalle de Bota Rama. En él se puede observar que durante los ensayos de bombeo aun con caudales muy bajos, entre 8 y 16 m³/h, los niveles presentan una tendencia clara a no recuperarse. Por si hubiera alguna duda, cuando se le ha sometido a una extracción continua de 100 m³/día durante algo más de dos años y medio, el nivel de recuperación se ha estabilizado, durante más de un año, en una altura claramente inferior a la inicial. La conclusión es clara, ese caudal de bombeo se logra a base de extraer aguas de reserva del acuífero, siendo por tanto los caudales de infiltración menores que el caudal extraído. La importancia del hecho constatado, no radica en la merma de los volúmenes de reserva; sino en que la producción futura de cualquier captación de agua subterránea, se deberá cuantificar para esos caudales de infiltración y no en los caudales de bombeo que es capaz de suministrar un sondeo en los comienzos de su explotación.

La similitud de este gráfico con los ensayos de bombeo realizados en Muita Agua esta en la línea de descenso del nivel durante la producción. Los puntos del nivel, tomados en horas de bombeo o de reposo, quedan englobados dentro de una línea recta; que claramente indica que se está vaciando un deposito, recargado con un caudal de infiltración muy débil, quizás prácticamente nulo.

En el ensayo de bombeo escalonado (sondeo 246, ensayo 15/11/1983), con los dos primeros caudales: 2 y 4 m³/hora, se observa una tendencia a la estabilización; mientras que para el siguiente caudal (6,5 m³/h, ensayo de bombeo 11-14/1/84) el nivel desciende de forma continúa. Esto nos permite acotar el flujo de circulación:

$$f = \frac{Q_b}{2 R} \quad \text{estando } Q_b \text{ situado entre 4 y 6,5 m}^3/\text{hora}$$

El valor del radio de influencia obtenido por Burgeap en el acuífero de Muita Agua oscila entre 50 y 200 metros, suponiendo un valor máximo de 200 m, los valores del flujo de circulación oscilaran entre:

$$f = \frac{4}{2 \times 100} \Rightarrow f = 4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hora} \times \text{m}.$$

$$f = \frac{6,5}{2 \times 100} \Rightarrow f = 6,4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hora} \times \text{m}.$$

Suponiendo un ancho del acuífero de 400 metros, tal y como indica Burgeap, el caudal de circulación tiene que estar acotado entre:

$$Q(\text{circulación})_1 = 16 \text{ m}^3/\text{hora} \approx 384 \text{ m}^3/\text{día}.$$

$$Q(\text{circulación})_2 = 26 \text{ m}^3/\text{hora} \approx 624 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Luego el caudal circulante oscila entre 624 y 384

m³/día; el caudal disponible será este valor menos el caudal que sale por los nacientes (471 m³/día). Por tanto el caudal disponible debe oscilar entre 0 y 153 m³/día.

El caudal captable por la galería (0,81 x caudal disponible) será entonces de:

$$Q(\text{captable})_1 = 0 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q(\text{captable})_2 = 124 \text{ m}^3/\text{día}$$

II.8.3.- Resumen de los valores de caudal obtenidos

A continuación se indican todos los valores obtenidos: los hallados por Burgeap, los que resultan de rectificar los caudales de nacientes no considerados por Burgeap y por último, los hallados por nosotros de acuerdo con los datos de las "bassin de calage" y los ensayos de bombeo realizados por Burgeap.

Caudales en m ³ /día	METODO DEL BALANCE			METODO DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO	
	Burgeap	Comentario	Nosotros	Burgeap	Nosotros
Caudal disponible	960	825	420	960	153 - 0
Caudal captable	800	670	350	800	124 - 0

El máximo valor hallado por nosotros con el método de los ensayos de bombeo ($124 \text{ m}^3/\text{día}$), corresponde al caudal de $6,5 \text{ m}^3/\text{hora}$ ensayado por Burgeap que provocaba un descenso continuo. Por tanto, este valor máximo es excesivo para el acuífero, lo que obliga también a desestimar el valor máximo, calculado por nosotros, según el método del balance hídrico ($350 \text{ m}^3/\text{día}$).

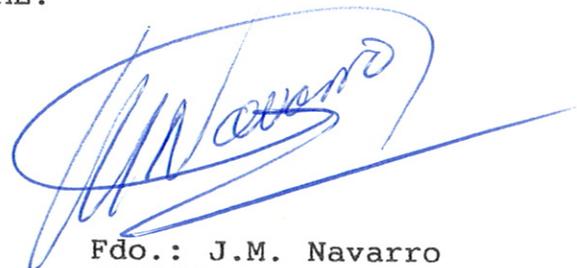
En resumen, el método más fiable para determinar el caudal de circulación en un acuífero, dados los inconvenientes que presenta la determinación de los parámetros hidrológicos, es a partir de los ensayos de bombeo. El valor obtenido por nosotros, aplicando éste método en los ensayos realizados por Burgeap, indica que el caudal puede ser como máximo de $124 \text{ m}^3/\text{día}$. No obstante y debido a que este valor resulta de escoger siempre los valores máximos, la realidad es que el caudal de la Cuenca subterránea de Muita Agua está actualmente en su práctica totalidad saliendo por los nacientes. Por tanto, el caudal que deberá captar la galería a construir es prácticamente nulo.

Santa Cruz de Tenerife a 15 de Mayo de 1992

LOS AUTORES DEL INFORME:



Fdo.: Carlos Soler Liceras
INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Fdo.: J.M. Navarro
GEOLOGO



Photo 1.- Vue generale de la Ribeira Santa Clara.

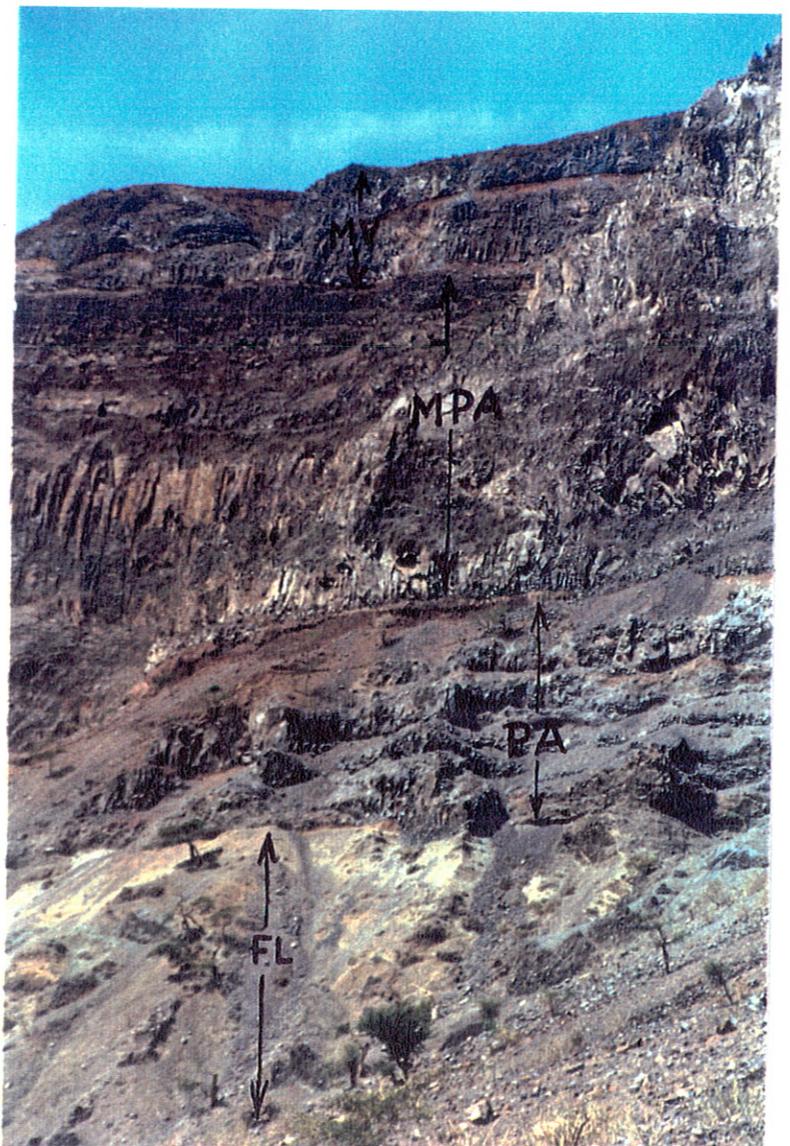
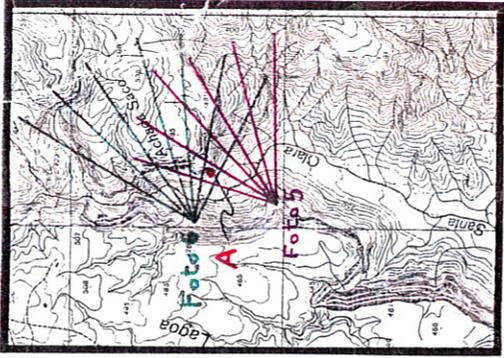
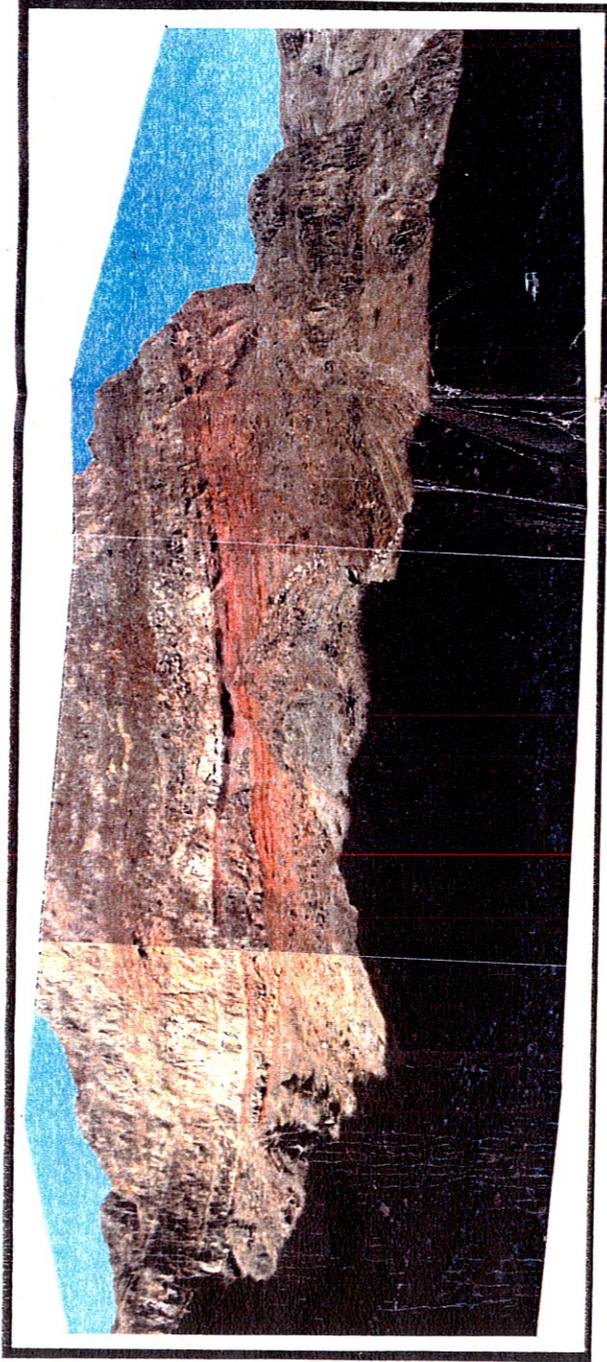


Photo 2.- Succession stratigraphique dans la Ribeira Santa Clara: Formation Flamengos (FL), Complexe Eruptif du Pico Antonia (PA), Coulées du Pico Antonia (MPA) et Formation du Monte das Vacas (MV).



point de vue

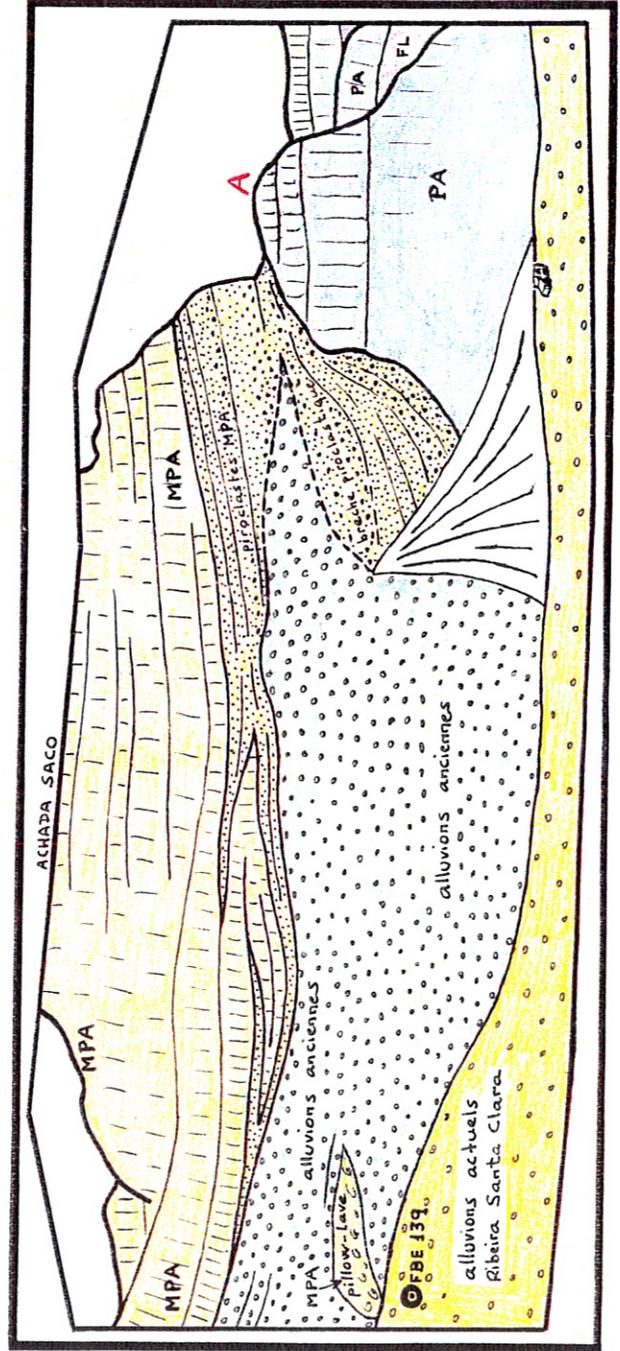
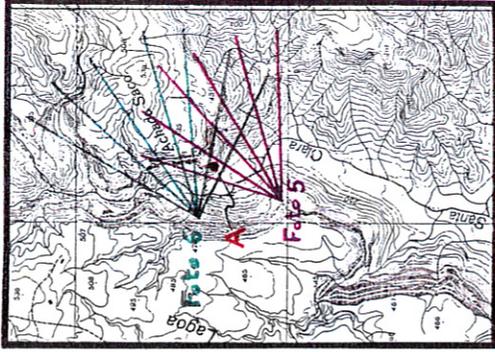


Photo 6.- Rive gauche de la Ribeira Santa Clara (continuation de la Photo 5). Dans cette section de la Ribeira, la vallée fossile est remplie aussi des alluvions anciennes imperméables, mais le fond n'est pas visible pour être placé au-dessous de la Ribeira; néanmoins, le forage FBE 139 a intersecté le substratum imperméable (FL) à 18 mètres de profondeur, sans trouver de l'eau souterraine. Les sources plus importantes du bassin de Muita Agua se trouvent quelques dizaines ou centaines de mètres à gauche de la photo (amont); les émergences écoulent au (ou près de) contact entre les coulées perméables MPA et les alluvions anciennes imperméables (voir Photo 10).



point de vue

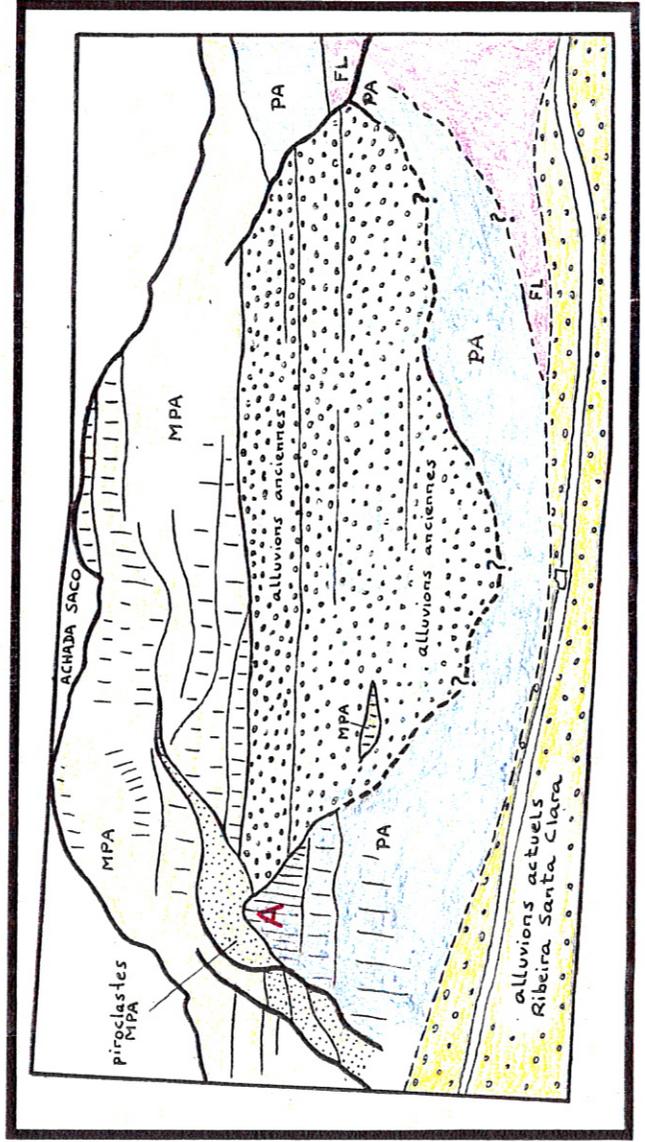


Photo 5.- Rive gauche de la Ribeira Santa Clara. Limite meridional de la vallée fossile de Muita Agua, sous Achada Saco. Le fond de la vallée, creusée au substratum impermeable (FL, PA), est rempli des alluvions pre-MPA aussi impermeables. Ce fond est placé a cote plus haute que celle de la Ribeira Santa Clara, comme on peut voir sur le terrain dans la rive droite. Voir continuation avec Photo 6.



Photo 3.- Coulées MPA sur alluvions anciennes pre-MPA, rive droite de la Ribeira Santa Clara. Les deux formations comblent une vallée fossile sous Achada Lagoa, creusée dans la Formation Flamengos (FL). Il y a une source principale (566) dans une lave fissurée intercalée entre les alluvions anciennes (voir Photo 4).

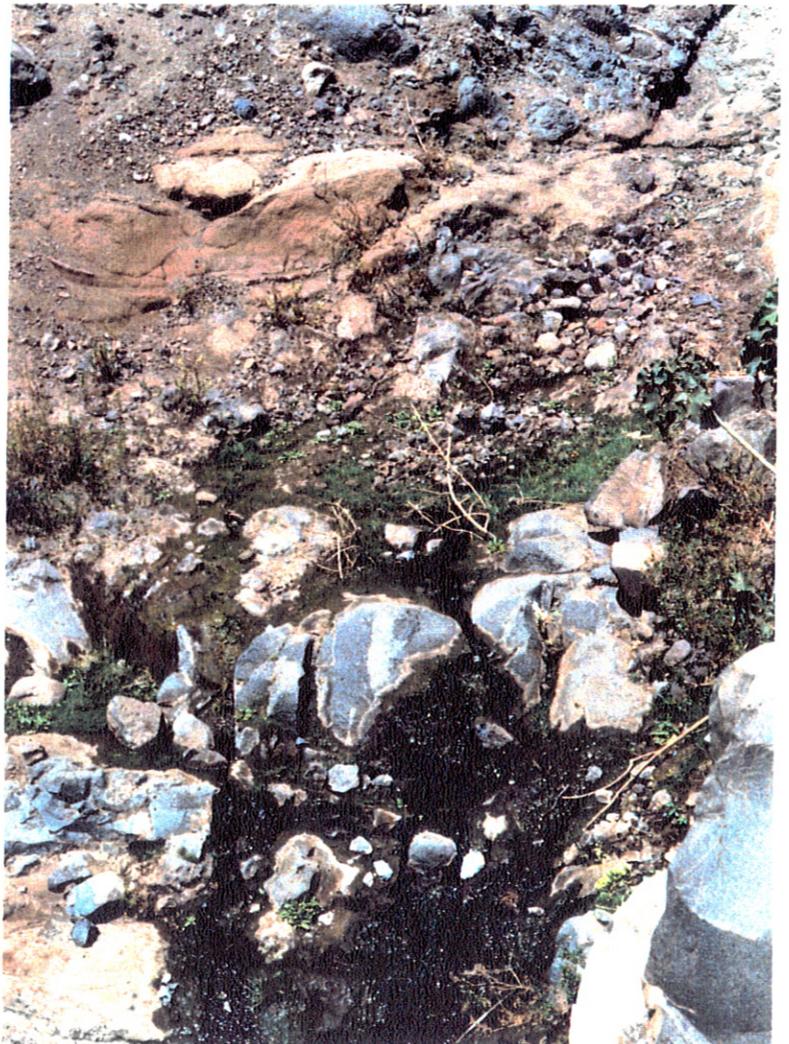


Photo 4.- Detail de la source 566 (voir Photo 3).



Photo 7.- Detail des alluvions anciennes pre-MPA. Les cailloux sont contenus dans une pate argileuse qui reduit extremement la permeabilite.



Photo 8.- Coulées MPA. L'existence de nombreux fissures et espaces vides est responsable de la bonne permeabilite de ces roches.

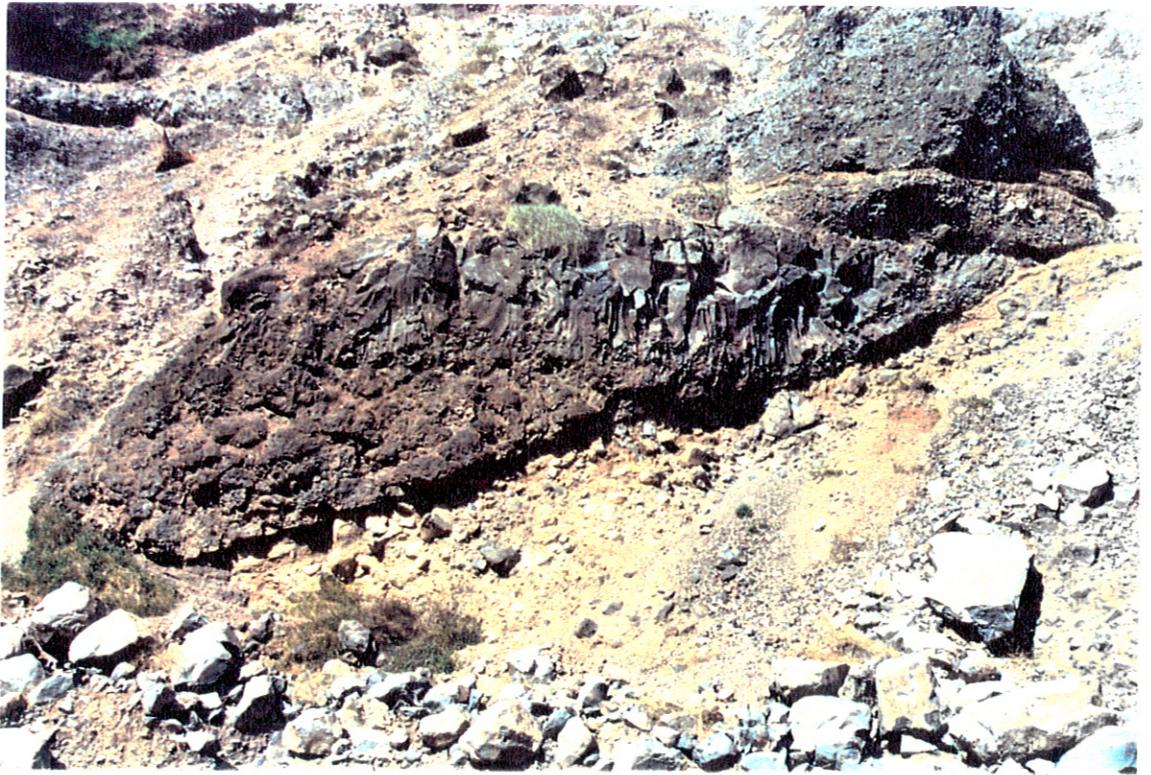


Photo 9.- Coulée MPA intercalée entre les alluvions anciennes pre-MPA. L' esturcture pillow (moitié inferieure de la coulée) a été originée quand la lave a envahi les eaux sommaires d'un lac ephemere.

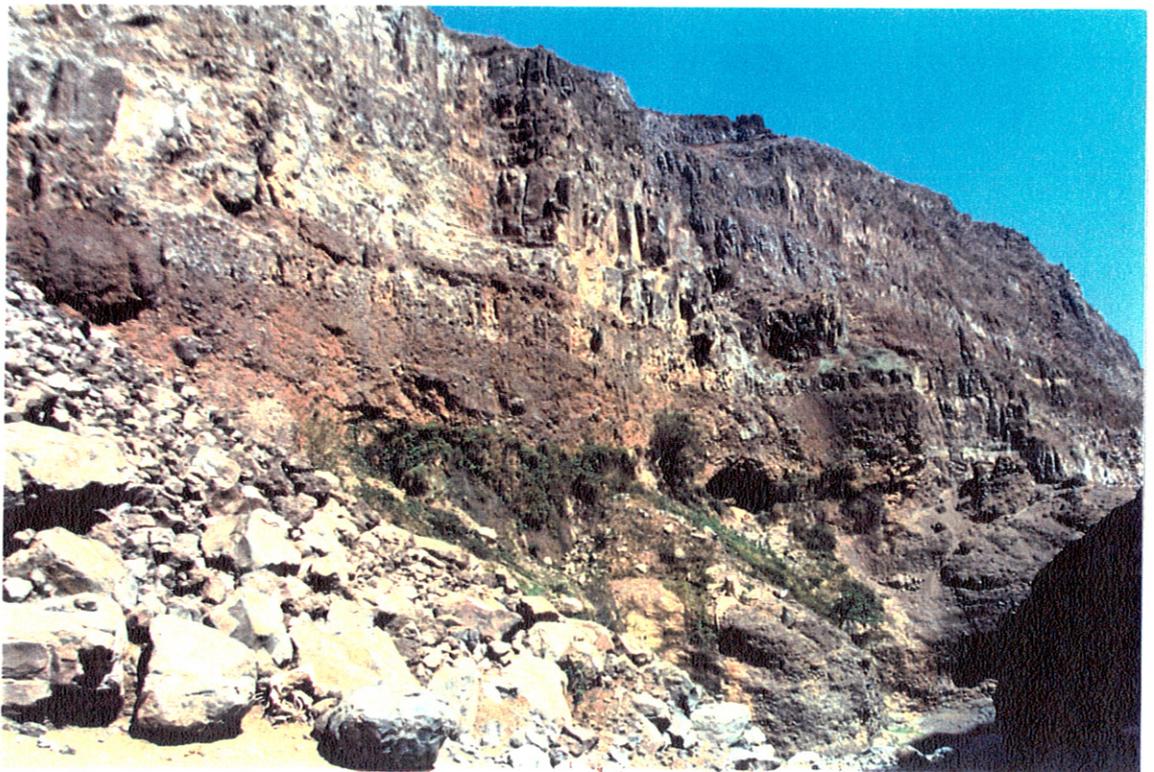


Photo 10.- Source 565, rive gauche de la Ribeira Santa Clara. L' eau ecoule au contact entre une breche volcanique MPA et les alluvions anciennes pre-MPA.



Photo 11.— Ribeira da Rede. Leur fond plat peut faciliter l'accès au forage proposé dans ce rapport.

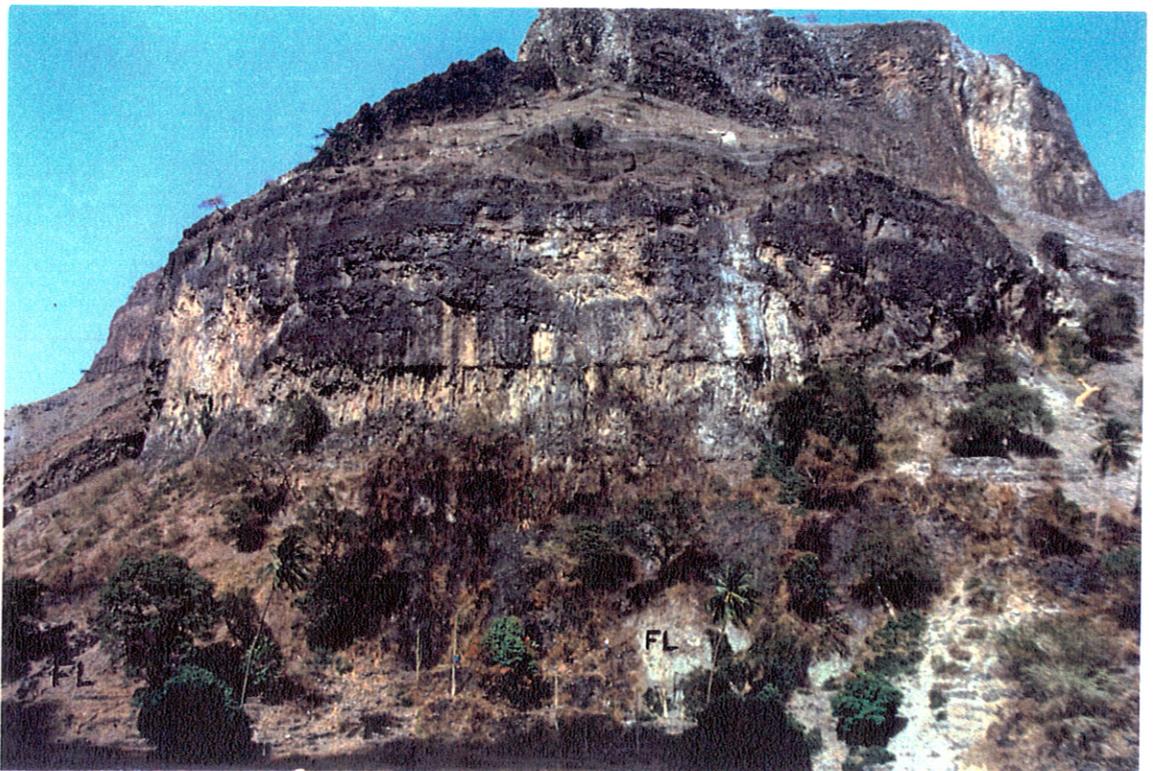


Photo 12.— Source de Matinho, partie inférieure de la Ribeira Santa Clara (bassin du Mosquito).

BIBLIOGRAFIA

- Rapport R. 506-1170 novembre 1982
Programme de reconnaissance des aquiferes de Santiago
en vue de la création de galeries - compte rendu de la
mission de L. Bourguet.
- Rapport CGG mai-juin 1983
Reconnaissance par prospection électrique de l'île de
Santiago.
- Rapport R. 548/E.1397/11-83
Etude generale du Massif du Pico da Antonia, Santiago,
1982 -1983.
- Rapport CGG mai-août 1984
Prospection géophysique par sondages électriques sur
les Iles de Fogo et Santiago.
- Rapport R606-E1520 décembre 1984.
Présentation des alternatives pour le massif du Pico da
Antonia.
- Dossiers de factibilité DF4, DF5-E1718 février 1986
Dossiers de factibilité des galeries de Muita Agua et
Mosquito pour l'alimentation en eau de Praia.
- Rapport 90-20; 45/CV; juillet 1991
Ressources en eau captables a partir de la Ribeira de
Santa Clara. Synthèse des données hydrogeologiques.

