

CAPÍTULO 3

MARCO HIDROGEOLÓGICO

3.1.- Introducción

En este capítulo se describen antecedentes generales acerca de la hidrogeología del área de estudio. Se presenta un inventario actualizado de los principales puntos de agua, indicándose su localización, características constructivas de las captaciones e indicación del objetivo de su utilización en esta investigación. A partir de la interpretación de la geología del subsuelo descrita en el capítulo anterior se define la geometría del acuífero. También se realiza una caracterización hidrogeológica de las formaciones volcánicas del área de estudio, que incluye la determinación de algunos parámetros hidráulicos de las rocas del Complejo Basal a partir de los dos ensayos de bombeo disponibles. Finalmente se analiza la evolución de la piezometría a partir de datos obtenidos de los inventarios anteriores y su comparación con los datos obtenidos en esta investigación.

3.2.- Características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas

Debido a diversidad de tipos litológicos y génesis de las formaciones volcánicas, estas presentan características hidrogeológicas muy variables dentro del grupo de rocas consolidadas. Los principales factores que van a determinar las características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas son el tipo de volcanismo, la distancia desde el centro de emisión, la tectónica, los efectos de la edad y la presencia de materiales no volcánicos interestratificados (Custodio, 1986). Todos estos factores inciden en un mayor grado de anisotropía y heterogeneidad del medio y, por lo tanto, en la circulación del agua subterránea.

En regiones volcánicas la geometría de los acuíferos queda controlada principalmente por los contrastes de permeabilidad entre los distintos materiales volcánicos, así como por el manto de las coladas de lava y los depósitos piroclásticos. También ejercen un control importante la disposición espacial de las unidades subvolcánicas asociadas al volcanismo.

En zonas próximas a los centros de emisión volcánicos pueden encontrarse productos piroclásticos de poca permeabilidad (principalmente tobas litificadas y depósitos de cenizas), que quedan interestratificados con coladas de lava más permeables y que pueden actuar a modo de barreras casi horizontales (Custodio y Llamas, 1983).

Dentro de los intrusivos subvolcánicos asociados al volcanismo se destacan los diques, ya que estos pueden constituir barreras impermeables o poco permeables al flujo de agua subterránea, o por el contrario facilitar el movimiento del agua paralela a los mismos (Custodio, 1978). También pueden ejercer un control importante en la circulación del agua los "sills", ya que al igual que los productos piroclásticos poco permeables éstos se disponen entre coladas de lava de mayor permeabilidad y actúan como barreras horizontales.

También puede ocurrir que las coladas de lava y los depósitos piroclásticos cubran formaciones aluviales en valles y barrancos preexistentes. Estas formaciones detríticas de mayor permeabilidad pueden actuar como drenaje de las formaciones volcánicas que las contienen y eventualmente dan origen a acuíferos semiconfinados (Custodio y Llamas, 1983).

La porosidad de las rocas volcánicas es muy variable según el tipo de rocas, pudiendo variar entre el 10 y el 50% en rocas piroclásticas, hasta menos de 5% en lavas masivas y sin vesículas (Custodio, 1978). En el caso de las lavas, las diferencias de porosidad tienen su origen principalmente en los procesos de solidificación de las mismas. Así, lavas que se solidifican muy rápidamente no podrán desgasificarse, lo que dará lugar a gran cantidad de burbujas de gas aprisionadas que conducirán a una textura vesicular. Por otro lado la porosidad puede variar significativamente en una misma colada de tal forma que la parte superior de las coladas, donde se concentra la mayor cantidad de burbujas de gas tendrá una textura vesicular y por lo tanto una mayor porosidad, mientras que la parte central de la misma será más masiva y menos porosa. En general la porosidad de las rocas volcánicas disminuye con el paso del tiempo debido a que eventualmente los procesos de meteorización y colmatación reducen significativamente el volumen de huecos en las rocas.

La permeabilidad de las rocas volcánicas puede variar significativamente debido a la heterogeneidad del medio volcánico. En general los distintos tipos de materiales volcánicos y los intrusivos subvolcánicos asociados al volcanismo darán como resultado permeabilidades muy variables. Como regla general las rocas volcánicas de composición basáltica presentan mayor permeabilidad que las rocas volcánicas más ácidas, y las lavas más modernas son más permeables que las más antiguas (Custodio y Llamas, 1983), aunque las variaciones de esta regla son muy numerosas. No necesariamente rocas volcánicas con elevada porosidad presentarán elevada permeabilidad, debido a las estructuras propias de las rocas volcánicas, como sucede por ejemplo en rocas volcánicas con gran cantidad de vesículas que le dan una alta porosidad, pero que no están conectadas.

3.3.- Inventario de puntos de agua

3.3.1- Datos recopilados

Para evaluar el funcionamiento hidrogeológico del área de estudio se realizó un inventario detallado de los manantiales, pozos y sondeos. Esta información fue complementada con los datos de inventario de los siguientes proyectos que incluyen la zona de estudio: “Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias” (SPA-15, 1975); “Estudio de la evaluación de recursos en cantidad y calidad de la Isla de Fuerteventura y sus formas de explotación”(MAC-21, 1982) y “Proyecto de actualización de la infraestructura hidrológica, vigilancia y catálogo de acuíferos” (ITGE, 1991).

Los datos del proyecto SPA-15 en la Isla de Fuerteventura son muy reducidos debido a que la extensión principal de este proyecto se centro en las islas de Gran Canaria y Tenerife. Las aportaciones principales de este reconocimiento y estudio en Fuerteventura se refieren a

una caracterización general de la calidad de las aguas subterráneas. Sin embargo, la localización geográfica de los distintos puntos de agua en que se tomaron muestras para análisis químicos no aparece claramente referenciada en la memoria, por lo que su utilidad es muy limitada.

En el marco del proyecto MAC-21, el Cabildo Insular realizó un inventario exhaustivo de las captaciones de toda la isla y que cubrió más de 500 pozos en la zona. El trabajo de localización, inventario, características de las captaciones y toma de muestras de agua fue realizada por miembros de la Legión Extranjera. Dentro de este proyecto se incluyen medidas del nivel piezométrico en las captaciones y en algunos casos análisis químicos de las aguas. Dada la dificultad de revisar la gran cantidad de pozos indicados en este inventario y debido a que muchos de los mismos se encuentran abandonados, secos o presentan un grado importante de contaminación agrícola y animal, sólo fueron visitadas aquellas captaciones cuya ubicación era de interés para los objetivos de la investigación y que además presentaban una adecuada protección a la contaminación. El inventario que se presenta de estos puntos en esta investigación ha sido separado del inventario general debido a la gran cantidad de puntos que lo componen. En la Tabla 1 y la Figura 1 de Anejo 3 se presenta la situación de los puntos de este inventario que han sido utilizados en esta investigación y su situación geográfica, respectivamente.

En el inventario realizado por el ITGE durante los años 1988-1990 se consideraron principalmente los sondeos construidos con posterioridad a la realización del inventario realizado en 1980 por el Cabildo Insular de Fuerteventura. En este inventario se contabilizaron 275 pozos perforados por métodos mecánicos, de diámetro entre 250 y 450 mm, y 40 sondeos de reconocimiento de pequeño diámetro (125 mm) perforados, la mayoría por el Servicio Geológico de Obras Publicas. También fueron inventariados algunos pozos de gran diámetro y profundos con el fin de actualizar los datos del inventario del Cabildo Insular. Los principales datos considerados en este inventario fueron: situación geográfica (situada en mapas a escala 1:25.000), características de la obra, datos de niveles, caudales de bombeo, calidad del agua *in situ* y análisis químico completo de componentes mayoritarios en laboratorio.

3.3.2.- Datos inventariados

En esta tesis se visitaron un total de 70 puntos, de los cuales 42 corresponden a la red de control periódica para la obtención de muestras de agua subterránea y medición del nivel freático. Muchos de los puntos de agua fueron seleccionados con objetivos distintos, según sus posibilidades. En algunos casos se seleccionaron los sondeos en los que se explota el agua por medio de bombas, por la representatividad de las muestras de agua obtenidas para análisis químico en campo y laboratorio. Sin embargo, en muchos casos era imposible obtener una medida del nivel freático en estos puntos debido a la obstrucción por las cañerías de bombeo. Por otro lado la mayoría de los pozos de gran diámetro se encontraban contaminados por la

acción de palomas y otros vertidos, pero sin embargo eran muy útiles para la medición del nivel freático al encontrarse en zonas aisladas donde no existían otros puntos de agua. Todos los puntos fueron seleccionados de forma que estuvieran repartidos lo más homogéneamente posible por toda la superficie del acuífero.

La campaña de noviembre de 1999 tuvo por objetivo el inventario de manantiales (“nacientes”) en las partes altas del Macizo de Betancuria. En total se inventariaron 6 manantiales en el área de Betancuria, uno en las proximidades de Pájara y uno en las partes altas de Tuineje.

La ubicación de los distintos pozos y sondeos en el campo se realizó con la ayuda de fotografías aéreas a escala 1:33.000 de las líneas de los vuelos 5499-5513, 5515-5530, 5533-5548, 5569-5583 y 5587-5602 del llamado vuelo americano de 1954. Posteriormente, esta información fue traspasada a mapas topográficos a escala 1:25.000 del Servicio Geográfico del Ejército.

En la Tabla 2 y la Figura 2 del Anejo 3 se presenta las distintas características de los puntos de agua considerados en esta investigación y la situación de cada uno de estos puntos respectivamente.

3.3.3.- Características generales de los diferentes puntos de agua

Como se mencionó anteriormente, los principales puntos de acceso al acuífero en Fuerteventura corresponden a manantiales, pozos de gran diámetro excavados a mano y sondeos profundos.

Los manantiales se localizan principalmente en zonas altas del Macizo de Betancuria y se caracterizan por caudales muy reducidos, que en general no superan unos pocos litros al día. En el curso superior del Barranco de la Peña se ha observado que algunos manantiales quedan definidos por las estructuras características de las coladas de lava basálticas en un medio submarino. Así, el agua aparece en la parte superior vesicular de coladas basálticas, sobre una parte central masiva y con “pillows” de la misma unidad. También aparecen manantiales en lavas situadas inmediatamente en el contacto sobre rocas intrusivas.

Los pozos, muy abundantes en toda el área, han sido excavados en la mayoría de los casos para usos agrícolas y ganaderos, y presentan caudales reducidos. La mayor parte de los pozos ha sido excavados por métodos manuales, según el método tradicional de las islas, con diámetros que varían entre 1,5 y 3 m. Tienen una profundidad generalmente inferior a los 80 m. Excepcionalmente alguna de estas obras alcanza profundidades de más de 80 m y explotan agua de lo que más adelante se definirá como Unidad Inferior. En la mayoría de los pozos que se encuentran en explotación la extracción se hace por medio de molinos de viento, los cuales ponen en movimiento un pistón que eleva el agua hasta la superficie. En la localidad de Tuineje y sus alrededores la gran mayoría de estas captaciones se encuentran actualmente abandonadas debido al descenso general del nivel freático, y según sus habitantes presentan agua sólo en periodos muy lluviosos.

Los sondeos han sido construidos masivamente en el área a partir de 1987, y la gran mayoría se concentran en las localidades de Tuineje, Tiscamanita y Tesejerague. Casi todos han sido perforados por mecanismos de percusión y rotopercusión, con diámetros que van desde los 200 a los 600 mm y profundidades que pueden alcanzar los 250 m. El diámetro más habitual es de 300 mm. Una parte importante de estas captaciones sólo tiene entubación en los primeros tres metros ya que han sido perforados en rocas consolidadas.

3.4.- Geometría del acuífero

La definición de la geometría de las unidades acuíferas se ha realizado de acuerdo a los datos obtenidos en el inventario del ITGE (1991). Esta se basa en las descripciones litológicas de sondeos presentes en este inventario y que corresponden a una recopilación de datos aportados por las empresas constructoras de las captaciones de agua. También se cuenta con algunas descripciones más detalladas de sondeos de investigación realizados por el extinto Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) con el objetivo de la exploración geológica e hidrogeológica. En el caso de las descripciones geológicas realizadas en algunos sondeos para captación de agua, existen dudas en cuanto a la calidad de la interpretación, debido a que la descripción se hizo al detritus recuperado de la perforación a rotopercusión, y por lo tanto pueden existir deficiencias en cuanto a la calidad de las muestras obtenidas.

A partir de la distribución de las unidades geológicas más importantes se puede dividir el área de estudio en dos dominios principales: un *Dominio Occidental*, constituido por rocas volcánicas e intrusivas del complejo Basal y un *Dominio Oriental*, compuesto por lavas miocenas del Edificio de Gran Tarajal y por depósitos volcánicos y sedimentarios del Pleistoceno-Holoceno. El límite entre ambos dominios se sitúa en la Depresión Central y en parte se encuentra cubierto por depósitos aluviales recientes y depósitos de caliche. Corresponde a un cambio litológico brusco y en planta es aproximadamente rectilíneo, por lo que no se descarta que corresponda a un contacto por falla. La posible existencia de esta falla puede argumentarse por que en los sondeos profundos realizados en el Malpaís y contiguos a las rocas volcánicas del Complejo Basal no se encuentran las rocas de esta última unidad. Esto indicaría que la continuidad de las lavas del complejo Basal se trunca abruptamente en este contacto, por lo que no tienen continuidad bajo las lavas de la Serie I Inferior del Edificio Gran Tarajal (Figura 3.1).

Dominio Occidental

El Dominio Occidental abarca la mitad occidental del área de estudio y esta compuesto principalmente por rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal. De la interpretación geológica de los numerosos sondeos realizados en Tuineje y Tiscamanita se deduce que espacialmente las rocas volcánicas se sitúan sobre las rocas intrusivas. A partir de las diferencias geológicas, hidrogeológicas y espaciales de los materiales que constituyen este dominio, se ha dividido en dos unidades hidrogeológicas: Unidad Superior y Unidad Inferior.

Unidad Superior: esta unidad esta constituida por lavas y tobas que conforman el Complejo Basal. Los tipos litológicos más característicos corresponden a traquibasaltos, traquitas, basaltos, brechas y tobas soldadas. Desde el punto de vista estructural, la Unidad Superior se encuentra cortada por una densa malla de diques de orientación principal N15°E. El espesor de la unidad es variable, siendo 68 m el máximo valor medido en un sondeo, aunque no se descartan espesores mayores en zonas donde no se observan intrusivos en superficie y no existen registros litológicos. En superficie esta unidad puede estar cubierta por depósitos de relleno de barranco, depósitos coluviales y costras de caliche. El límite inferior de la unidad es irregular y queda definido por un contacto por intrusión con rocas plutónicas del Complejo Basal.

Unidad Inferior: esta compuesta por rocas intrusivas correspondientes a la Serie Ultraalcalina Inicial y de la Serie Plutónica Alcalina Indiferenciada. La mayor cantidad de puntos de observación de la Unidad Inferior corresponden a sondeos profundos localizados en las localidades de Tuineje y Tiscamanita. En la vertiente occidental del Macizo de Betancuria existen escasos puntos de observación de esta unidad. También se pueden encontrar zonas donde las rocas intrusivas se encuentran próximas o en superficie, como sucede en el área de Tiscamanita, lo que da lugar a implicaciones hidrogeoquímicas características. El límite superior de esta unidad queda definido por un contacto por intrusión, en la que rocas de esta unidad aparecen intruyendo a rocas volcánicas del Complejo Basal.

Dominio Oriental

El Dominio Oriental se localiza en la mitad E del área de estudio y esta constituido por lavas basálticas e intercalaciones de piroclastos correspondientes al Edificio Gran Tarajal, así como por un antiguo aluvial reconocido bajo el campo de lavas recientes del Malpaís.

En el Edificio Gran Tarajal la zona saturada se localiza específicamente en la Serie I Inferior de este antiguo volcán y corresponde a la base de la estructura volcánica. Son coladas de lava tabulares que pueden alcanzar una continuidad de varios kilómetros y que se encuentran ligeramente inclinadas hacia el Este. Corresponden a basaltos de piroxeno y basaltos de piroxeno y olivino, con escasos niveles piroclásticos intercalados. En la Depresión Central esta unidad aparece cubierta por depósitos aluviales y por lavas recientes que conforman el Malpaís, mientras que en los “cuchillos” aparece cubierta por rocas de la Serie I Intermedia y Superior del mismo volcán. El límite inferior de esta unidad no se reconoce en ninguno de los sondeos profundos del área de estudio, pero se deduce que puede ser un contacto por discordancia angular con las lavas submarinas del Complejo Basal.

En la Depresión Central y el Barranco de Pozo Negro, sobre las rocas de la Serie I Inferior y bajo las coladas de lava del Malpaís se reconoce un antiguo aluvial que presenta una forma tabular, alargada en dirección E-W y que se inclina ligeramente hacia el este. Hacia los bordes norte y sur esta unidad se acuña (Figura 3.2). El espesor máximo de esta unidad medido en el sondeo S-96 alcanza los 14 m. Como se indicó en el capítulo anterior la unidad

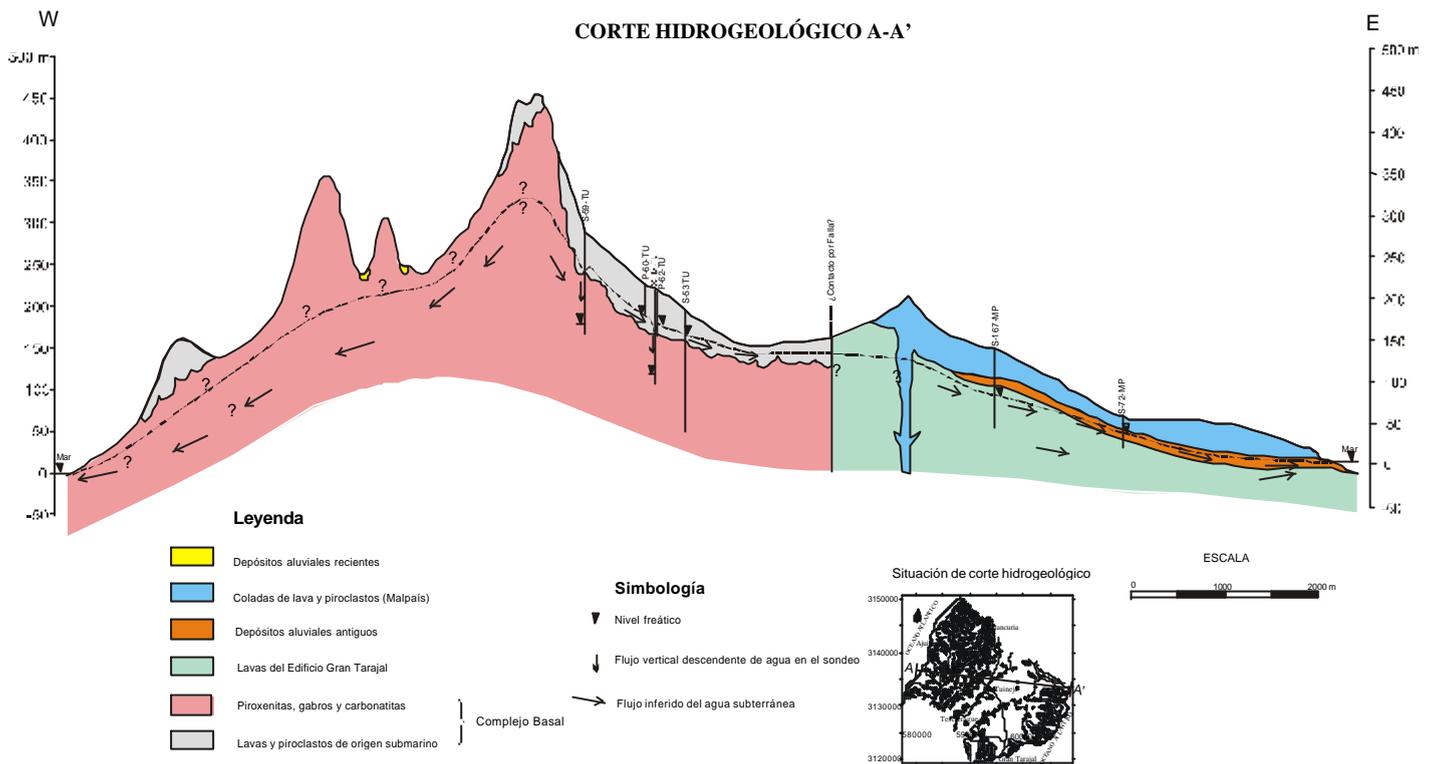


Figura 3.1.- Corte hidrogeológico esquemático W-E del área de estudio. Escala vertical exagerada.

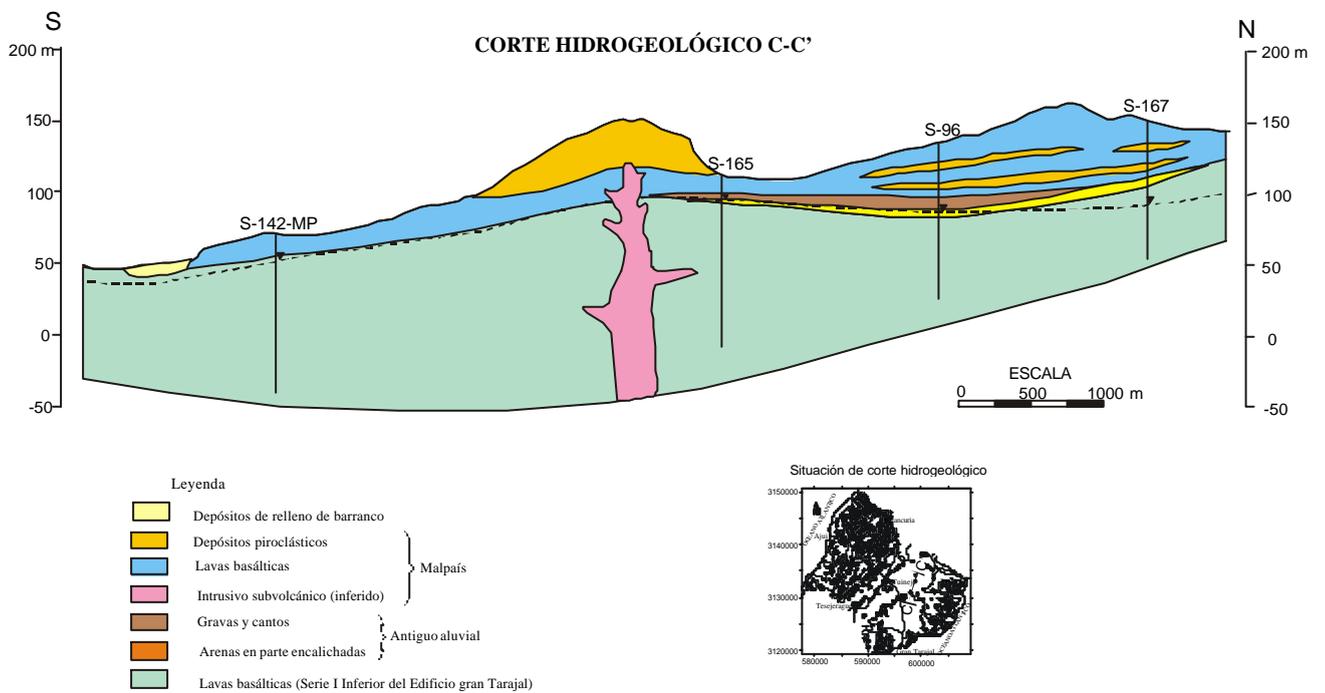


Figura 3.2.- Corte hidrogeológico esquemático del sector del Malpais. Escala vertical exagerada.

está constituida por dos tramos principales: a) un tramo superior constituido por cantos de rocas volcánicas antiguas y b) un tramo inferior de menor potencia, compuesto por arenas, en parte cementadas por caliche, que han sido descritas como un antiguo paleosuelo.

3.5.- Características hidrogeológicas de los materiales

Dominio Occidental

Unidades intrusivas

Estas unidades afloran principalmente en la parte occidental del área de estudio. En la Depresión Central, en superficie se reconocen afloramientos aislados de esta unidad, pero a partir de las descripciones geológicas de los sondeos se interpreta una amplia distribución de estas rocas a mayor profundidad.

Esta unidad esta compuesta por rocas intrusivas de composición básica y ultrabásica, entre las que se destacan, por la extensión de sus afloramientos, piroxenitas, gabros y melteijitas, y sienitas y carbonatitas en los términos más diferenciados. Todos estos materiales se incluyen dentro del grupo de rocas cristalinas y en general presentan valores de baja permeabilidad. Sin embargo, algunos sondeos profundos en Tuineje explotan agua desde rocas intrusivas con caudales de hasta 5 L s^{-1} , lo que indicaría condiciones favorables locales. Probablemente las zonas con mayor permeabilidad de esta unidad están asociadas a zonas con una fracturación importante. No obstante, no esta claro el papel que desempeña la gran cantidad de diques que cortan a estas rocas, por lo que no se descarta que estos caudales de mayor importancia estén relacionados con ellos. Como ejemplo de esta posible influencia de los diques en la circulación del agua subterránea esta el caso observado por el autor en el área de la Presa de las Peñitas. En el barranco del mismo nombre, aguas abajo de esta presa se reconoció un manantial cuyas aguas surgían en el contacto entre rocas intrusivas de composición sienítica del Complejo de Vega de Río Palmas y un dique de composición gabroide de 1 m de potencia y que cortaba a estas rocas intrusivas. El caudal estimado aproximado de este manantial es de 1 l/s. El origen de este manantial se supone que corresponde a aguas que circulan en las rocas intrusivas y que proceden de la presa, las cuales son colectadas por el dique, que actúa como dren de descarga dado su importante superficie de contacto con las rocas intrusiva. La descarga a través del dique se hace en el barranco aguas debajo de la presa, debido a que el mismo es cortado por el barranco. En la Figura 3.2 se presenta un perfil hidrogeológico esquemático de este fenómeno.

Los estudios para la determinación de parámetros hidráulicos en el Complejo Basal son muy escasos y se reducen a la realización de dos ensayos de bombeo y recuperación. Uno de los ensayos fue realizado en la localidad de Tuineje y el otro en el caserío de Juan Gopar (sector de Tesejerague). Para la interpretación de los ensayos de bombeo se ha utilizado el programa de ajuste automático EPHEBO, desarrollado por el Departamento de Ingeniería del terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña. Este programa permite simular los ensayos de bombeo según varios modelos, dependiendo de las características del acuífero. En ambos

casos fue utilizado el Modelo General (Barker) que considera como una opción de ajuste la capacidad del pozo. Los datos del ensayo de bombeo y recuperación, así como las gráficas resultantes de la interpretación se presentan en el Anejo 3.3. Los valores de transmisividad obtenidos en estos ensayos varían entre 47 y 114 m² día⁻¹. Por otro lado debido a que las medidas de los descensos se realizaron en los mismos pozos de bombeo, no se puede determinar de forma precisa el almacenamiento.

Los parámetros hidráulicos obtenidos de estos ensayos de bombeo fueron obtenidos en pozos cuyos caudales de explotación varían entre 4 y 5 L s⁻¹. Sin embargo, en la gran mayoría los casos los sondeos profundos dan caudales de explotación menores a 3 L s⁻¹ y por un tiempo de duración menor (ITGE, 1991).

Lavas submarinas y tobas del Complejo Basal

Corresponden a lavas de composición basáltica y textura masiva que han perdido la mayoría de las estructuras primarias, conservándose sólo en algunos casos estructuras “pillows” que indican su origen marino. Presentan un aspecto masivo y no se reconoce la presencia de vesículas. En las partes altas del Macizo de Betancuria, en cortes de carretera se ha observado un grado importante de fracturación de estas rocas. Las paredes de algunas fracturas se presentan fuertemente oxidadas, lo que indica la circulación de agua de recarga por las mismas, con la oxidación de minerales máficos.

La gran cantidad de diques que cortan a esta unidad con dirección N15°E indica que previo al emplazamiento de los diques esta unidad fue fuertemente afectada por un fracturamiento con esta dirección que permitió posteriormente la intrusión filoniana. Estas estructuras estarían asociadas al emplazamiento de numerosos cuerpos intrusivos que se emplazaron en esta unidad volcánica y que posiblemente permitieron el ascenso en superficie de las rocas volcánicas submarinas. Esta intensa fracturación a la que ha sido sometida esta unidad posiblemente incide en una mayor permeabilidad secundaria en estas rocas.

Dominio Oriental

Como se indicó en el apartado 3.4 este dominio lo componen rocas lavas subaéreas del Edificio Gran Tarajal (Serie I Inferior), Malpaís y un aluvial intercalado entre las dos unidades volcánicas mencionadas anteriormente.

No se dispone de datos hidráulicos cuantitativos de estas unidades volcánicas. En las lavas miocenas las descripciones litológicas de los sondeos indican la presencia de abundantes vesículas, lo que les daría una posible mayor permeabilidad. No obstante, según el ITGE (1991) las características de permeabilidad primaria de estas rocas volcánicas han sido reducidas notablemente debido a fenómenos de alteración y relleno posterior de los huecos.

En la Depresión Central y en el Barranco de Pozo Negro se reconoce un aluvial en parte saturado en agua el cual podría actuar como dren de las unidades volcánicas que lo encajan. Para esta unidad se espera una mayor permeabilidad respecto al resto de unidades

volcánicas, debido a que los materiales detríticos que lo componen presentan una granulometría gruesa.

3.6.- Caracterización de la recarga

Para el cálculo de la recarga se han aplicado dos métodos de estimación: hidrológico y químico. El método hidrológico ha consistido en un balance hidrometeorológico con la ayuda del programa EASY-BAL 2.5 desarrollado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña. El método químico se ha basado en el balance de cloruros. La principal dificultad para cuantificar la recarga por métodos hidrológicos ha sido la escasez de datos de temperatura a distintas cotas, así como la falta de medidas continuas de niveles piezométricos, necesarias para la calibración de un modelo.

Los puntos de estimación de la recarga han sido seleccionados de acuerdo a la cota, tipos litológicos y estructurales del entorno, relieve y existencia de vegetación. Estos coinciden con la ubicación de las estaciones de muestreo del agua de lluvia y con la ubicación de pluviómetros. A continuación se hace un resumen con las características principales de cada uno de los sectores seleccionados para la estimación de la recarga:

Betancuria: corresponde al punto de estimación de la recarga más elevado del Macizo de Betancuria. Para la estimación de la recarga por el método hidrológico se utilizan datos del pluviómetro situado en la localidad de Betancuria (400 ms.n.m.), mientras que para la estimación por el balance de cloruros se utiliza muestras de precipitación tomadas en Morro de Velosa (680 ms.n.m.) y agua de manantiales cuya cota de descarga se sitúa en torno a los 450 ms.n.m. Los tipos litológicos más característicos del sector corresponden a rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal. El relieve en este sector es muy accidentado. Las muestras de agua representativas de la recarga corresponden a la de pequeños manantiales del sector. En este sector también se observa un desarrollo de suelo de escasa potencia, el cual está cubierto por una vegetación de tipo arbustiva, entre las que sobresalen algunas palmeras.

Tuineje: Geográficamente se sitúa en la zona de transición entre el relieve montañoso del Macizo de Betancuria y la Depresión Central. El punto de estimación de la recarga tanto por el método hidrológico como por el de balance de cloruros se sitúa a una altura aproximada de 200 m. Hacia el oeste, en las partes más altas de este sector se observa el desarrollo de un suelo de escaso espesor y una cubierta vegetal de tipo herbácea de escaso desarrollo, compuesta principalmente por cactus y matorrales. Los tipos litológicos más característicos del entorno corresponden a lavas del Complejo Basal, aunque en algunos sectores de la Depresión Central estas rocas se encuentran cubiertas por extensos afloramientos de caliche.

Pájara: este punto se sitúa en la vertiente occidental del Macizo de Betancuria y en general corresponde a un relieve accidentado. La altitud del área seleccionada para la estimación de la recarga por el método hidrológico y de balance de cloruros es de aproximadamente 200 ms.n.m.

Pozo Negro: Corresponde al punto de estimación de recarga más bajo (100 m). Tanto las muestras de precipitación como de la recarga se localizan en el campo de lavas recientes de Malpaís. Lo llano del relieve unido a las características propias de las coladas de lava basálticas hacen que la escorrentía superficial sea nula.

3.6.1.- Balance hidrometeorológico

Con el objetivo de estimar la recarga se ha realizado un balance hidrometeorológico diario a partir de datos de precipitación diaria obtenidos en una serie de cinco años (1994-1999). Los valores de precipitación media anual utilizados son muy variables de un año a otro, y así resulta la estimación de la recarga, la cual en algunos años es nula y en otros más abundante. Para el cálculo se ha utilizado el programa EASY-BAL 2.5. Este programa consiste en una hoja de cálculo que calcula el balance diario de agua en el suelo a partir de los datos de precipitación diaria. La evapotranspiración potencial diaria se calcula a partir de la evapotranspiración media mensual según el método de Thornthwaite.

La temperatura utilizada para la estimación de la evapotranspiración potencial en Betancuria (400 ms.n.m) ha sido calculada a partir del gradiente de temperatura obtenido entre la estación de El Matorral (20 ms.n.m.) y la de Los Estancos (216 ms.n.m.). No se ha realizado el balance de agua en el suelo en la estación de Pájara, debido a la falta de algunos datos de precipitación.

En el área de estudio se reconoce una gran variedad de materiales que, sin duda, presentan capacidades de retención muy distintas. Los principales materiales presentes en superficie corresponden a:

- Depósitos aluviales (incluyen depósitos de relleno de barranco y depósitos aluviales antiguos)
- Depósitos de limos
- Depósitos de caliche
- Campos de lavas recientes del Malpaís
- Suelo de escaso espesor y con vegetación arbustiva, desarrollado en las partes altas del Macizo de Betancuria
- Rocas volcánicas antiguas
- Suelos más desarrollados que han sido cultivados en el pasado y que actualmente son terrenos baldíos

A partir de estos datos se puede esperar valores para la reserva útil máxima del suelo muy distintos de un lugar a otro. El ITGE (1991), a partir de estudios de percolación de suelos realizados en el Acuífero Costero de Arinaga-Tirajana (isla de Gran Canaria) y que considera con características muy similares a las de Fuerteventura, estima que un valor de reserva útil máxima de 50 mm es representativo de la media en Fuerteventura. No obstante, no descarta que este valor sea menor según las características concretas que presente el terreno (coladas recientes, depósitos de caliche y acarreos gruesos).

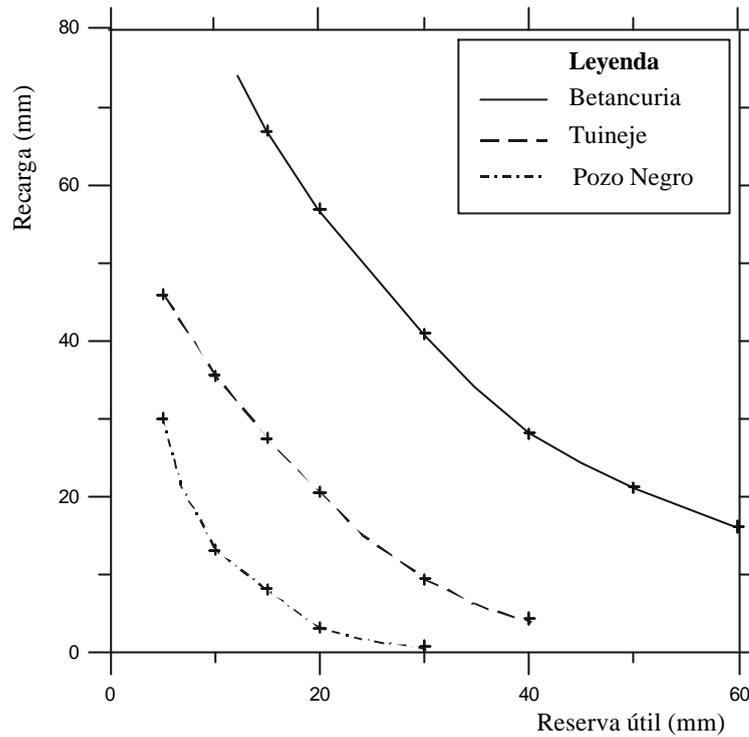


Figura 3.3.- Curvas características de recarga versus reserva útil para cada uno de los pluviómetros analizados (valores medios anuales).

Pluviómetro	Cota (m)	VL (mm)	RU (mm)	P (mm)	R (mm)	% R
Betancuria	415	10	15	209,9	66,86	31,9
Betancuria	415	10	20	209,9	56,86	27,1
Betancuria	415	10	30	209,9	40,84	19,5
Betancuria	415	10	40	209,9	28,08	13,4
Betancuria	415	10	50	209,9	21,76	10,4
Betancuria	415	10	60	209,9	16,14	7,7
Tuineje	200	30	5	119,2	45,9	38,5
Tuineje	200	30	10	119,2	35,5	29,8
Tuineje	200	30	15	119,2	27,52	23,1
Tuineje	200	30	20	119,2	20,56	17,2
Tuineje	200	30	30	119,2	9,44	7,9
Tuineje	200	30	40	119,2	4,42	3,7
Pozo Negro	20	30	5	97	30,1	31,0
Pozo Negro	20	30	10	97	13,2	13,6
Pozo Negro	20	30	15	97	8,14	8,4
Pozo Negro	20	30	20	97	3,22	3,3
Pozo Negro	20	30	30	97	0,8	0,8

Tabla 3.1.- Valores estimados de la recarga considerando distintos valores de reserva útil (RU) y de valor de laminación (VL). P = precipitación media anual para el período 1994-1999 en mm y R = recarga media anual para el mismo período.

Si bien las precipitaciones medias anuales obtenidas en los distintos pluviómetros son menores a los 200 mm, es necesario destacar que estas se producen solo durante algunos días del año (principalmente entre noviembre y abril) en un régimen de tormentas de fuerte intensidad. Dado que la gran cantidad de precipitaciones ocurre en un intervalo de tiempo corto, la capacidad de campo del suelo es superada en los comienzos de las precipitaciones, lo que permite una pequeña recarga al acuífero.

En este estudio se ha considerado una estimación de la recarga a partir de distintos valores de reserva útil y laminación (valor sobre el cual se produce escorrentía). La Tabla 3.1 presenta los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de estimación e incluye el valor de la recarga media anual de cada pluviómetro para los distintos años. En la estación de Betancuria se ha asignado un valor de laminación más bajo que el resto de estaciones, debido a la importante escorrentía que fue observada por el autor en este lugar y de la cual se dispone de un valor aproximado de la precipitación que la originó.

La Figura 3.3 presenta curvas características de la variación de la recarga para cada uno de los pluviómetros considerando distintos valores de reserva útil. Se observa que los valores más altos de la recarga se obtienen en Betancuria, mientras que los valores más bajos de la recarga corresponden a los estimados en Pozo Negro. Considerando el valor de reserva útil de 50 mm definido como valor medio característico para la isla de Fuerteventura se obtiene que en Betancuria esta alcanza los 20 mm, mientras que en las localidades de Tuineje y Pozo Negro ésta es prácticamente nula. No obstante, para las zonas más bajas donde la vegetación prácticamente no existe, se esperan valores de reserva útil más bajos que podrían variar entre 25 y 40 mm, con lo que la recarga, al menos en Tuineje, oscilaría ente 5 y 15 mm al año. No obstante en zonas más bajas y de menor cantidad de precipitaciones, como Pozo Negro, los valores de recarga siguen siendo prácticamente nulos.

Estos resultados indican que la mayor cantidad de recarga se producirá en las zonas más altas de la isla. No obstante, al no disponerse de datos concretos de la escorrentía es posible que una mayor cantidad de escorrentía en las zonas más altas incida en un menor recarga en estas partes de la isla. Las observaciones realizadas por el autor en campo indican que una parte importante de la escorrentía procedente de las partes más altas del Macizo de Betancuria queda encharcada en los márgenes del Malpaís como consecuencia de que las coladas volcánicas más modernas que lo componen obstruyen los caminos de los barrancos hacia el mar. Por lo que no se puede descartar una mayor cantidad de recarga en el sector del Malpaís como consecuencia de las aguas que quedan en estos charcos. Sin embargo, a partir de los datos que se dispone actualmente no se puede hacer una cuantificación de esta recarga.

3.6.2.- Balance de cloruros en estado estacionario

La estimación de la recarga mediante un balance de cloruros del agua en el suelo tiene su justificación en el comportamiento altamente conservativo de este ión (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1991; Falkland y Custodio, 1991; Iglesias *et al.*, 1996; Custodio, 1997). Las

ventajas de utilizar el ión cloruro en el balance de masas surgen como consecuencia de su alta solubilidad, ausencia de intercambio con el medio, origen conocido, baja concentración en los medios rocosos y fácil medición (Custodio, 1997). El método se basa en la comparación del aporte de cloruro en la lluvia con respecto al contenido de cloruro que transporta la recarga al nivel freático. Para la realización del balance de cloruros se requiere conocer la aportación media de cloruro del agua de lluvia, la recarga y la escorrentía.

Según la formulación propuesta por Custodio y Llamas (1983):

$$RC_R = PC_P - EC_E + A_S - A_V + A_V'$$

donde:

R = recarga (mm/año)

P = precipitación media (mm/año)

E = escorrentía superficial media (mm/año)

C_P = contenido medio en Cl en el agua de lluvia (mg L⁻¹)

C_R = contenido medio en Cl en el agua de recarga (mg L⁻¹)

C_E = contenido medio en Cl en el agua de escorrentía superficial (mg L⁻¹)

A_S = aporte de Cl tomados del suelo o aportados artificialmente (g m⁻² año⁻¹)

A_V = retención de Cl tomados por la vegetación (g m⁻² año⁻¹)

A_V' = devolución de Cl del suelo al morir la vegetación (g m⁻² año⁻¹)

El balance de cloruros se realiza suponiendo que el aporte de cloruros tomados en el suelo o aportados de forma artificial es nulo y que la retención de cloruros por la vegetación es igual a la liberación de los mismos al morir dicha vegetación. De estas suposiciones se obtiene que:

$$RC_R = PC_P - EC_E$$

En este estudio se ha realizado un balance de cloruros en estado estacionario en las localidades de Betancuria, Pájara, Tuineje y Rosa de Pozo Negro. La concentración de cloruro del agua de lluvia de cada punto se ha estimado a partir del valor medio para cada una de las estaciones de muestreo. Una limitación importante en esta estimación ha sido la gran variabilidad en la concentración de cloruro de las precipitaciones de cada estación de muestreo. Esto incide en una desviación típica importante de estos valores y por consiguiente en el valor estimado de la recarga. Dada la gran variación en la concentración de cloruro del agua de lluvia, este cálculo se ha realizado considerando dos hipótesis: (a) considerando el valor medio de cloruro de todas las muestras de lluvia obtenidas en cada estación de muestreo y (b) descartando las primeras muestras de lluvia del otoño y las muestras de lluvia ocurridas después de un período muy prolongado sin precipitaciones, ya que estas son las que presentan

una concentración de cloruro anormalmente alta.

Para la determinación de la concentración de cloruro del agua de recarga se han seleccionado puntos de agua próximos a las estaciones de muestreo del agua de lluvia. En las partes altas del Macizo de Betancuria se ha utilizado la concentración de cloruro del agua de algunos manantiales como representativa del agua de recarga (manantiales localizados en las proximidades de Pájara y Betancuria). En la zona del Malpaís se ha considerado como agua representativa de la recarga aquella localizada en la parte superior del acuífero que presenta una menor mineralización. En el área de Tuineje las muestras de agua representativas de la recarga se han considerado en dos puntos distintos: a) agua freática presente en lavas del Complejo Basal, situadas inmediatamente debajo de un suelo cuya potencia varía entre 0.1 y 0.2 m y b) muestras tomadas en depósitos aluviales.

En la Tabla 3.2 se presentan los valores calculados de la recarga para las distintas estimaciones de la concentración de cloruro de la lluvia. En todos los casos se observa que el valor estimado de la recarga es mucho mayor cuando se considera en el cálculo el valor mediano de la concentración de cloruro de todas las muestras de lluvia (hipótesis a). Del mismo modo el valor del error en la estimación de la recarga es muy alto y en algunos casos supera al valor estimado de la recarga.

Punto	P (*)	? _P	CP	? _{CP}	CR	? _{CR}	R	R(%)	? _R
Pozo Negro (1)	79,9	25	47,2	42	278	30	13,6	17,0	12,8
Pozo Negro (2)	79,9	25	25	5,6	278	30	7,2	9,0	2,8
Pájara (1)	115	30	91,8	75	921	20	11,5	10,0	9,8
Pájara (2)	115	30	53,4	27,8	921	20	6,7	5,8	3,8
Tuineje (1)	113,1	30	64,5	71,2	350	30	20,8	18,4	23,7
Tuineje (2)	113,1	30	27,5	5,4	350	30	8,9	7,9	3,0
Tuineje (3)	113,1	30	27,5	5,4	920	50	3,4	3,0	1,1
Morro de Velosa (1)	194,3	70	89,8	102	1340	50	13,0	6,7	15,5
Morro de Velosa (2)	194,3	70	26,5	18	1340	50	3,8	2,0	2,9

Tabla 3.2.- Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano de cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. C_P y C_R = contenido medio en cloruro en la precipitación y el agua de recarga; ?_P, ?_R, ?_{CP} y ?_{CR}, = desviación típica de la precipitación, de la recarga, de la concentración de cloruro de la precipitación y de la concentración de cloruro de la recarga. Concentraciones en mg L⁻¹. (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986.

El valor más bajo de la recarga se obtiene en Morro de Velosa (área de Betancuria) y se interpreta por la mayor escorrentía que se registra en este sector.

Los valores más altos de la recarga se observan en el campo de lavas recientes de Malpaís (Pozo Negro), donde alcanzan el 9% del valor de la precipitación media anual. Esta observación resulta particularmente interesante si se considera que es en este sector donde se registran las precipitaciones más bajas respecto al resto de puntos de observación.

Una segunda evaluación del balance de cloruros se realiza considerando la escorrentía.

No se tienen datos de la escorrentía media anual que se registra en zona, por lo que el cálculo se ha realizado considerando valores extremos definidos a partir de los valores medios de la precipitación anual. En el sector de Morro de Velosa se ha utilizado un valor de escorrentía más alto dada la mayor pendiente que se registra en este sector y por las observaciones realizadas por el autor en momentos en que se producía la escorrentía. La concentración de cloruros de la escorrentía se ha obtenido a partir del valor medio de las muestras de escorrentía y charcos que se obtuvieron durante las precipitaciones ocurridas el 13/03/99. La Tabla 3.3 presenta los valores de la recarga considerando la escorrentía en este cálculo. Los resultados obtenidos indican que no existen importantes variaciones de la recarga considerando el parámetro de la escorrentía en el cálculo respecto al cálculo realizado sin considerar escorrentía.

Punto	P (*)	CP	E	CE	CR	R	%R
Pozo Negro (1)	79.9	47.2	5	42	278	12.8	16.0
Pozo Negro (2)	79.9	25	5	42	278	6.4	8.0
Pájara (1)	115	91.8	5	42	921	11.2	9.8
Pájara (2)	115	53.4	5	42	921	6.4	5.6
Tuineje (1)	113.1	64.5	5	42	350	20.2	17.9
Tuineje (2)	113.1	27.5	5	42	350	8.3	7.3
Tuineje (3)	113.1	27.5	5	42	920	3.2	2.8
Morro de Velosa (1)	194.3	89.8	5	42	1340	12.9	6.6
Morro de Velosa (2)	194.3	26.5	5	42	1340	3.7	1.9
Punto	P (*)	CP	E	CE	CR	R	%R
Pozo Negro (1)	79.9	47.2	10	42	278	12.1	15.1
Pozo Negro (2)	79.9	25	10	42	278	5.7	7.1
Pájara (1)	115	91.8	10	42	921	11.0	9.6
Pájara (2)	115	53.4	10	42	921	6.2	5.4
Tuineje (1)	113.1	64.5	10	42	350	19.6	17.4
Tuineje (2)	113.1	27.5	10	42	350	7.7	6.8
Tuineje (3)	113.1	27.5	10	42	920	2.9	2.6
Morro de Velosa (1)	194.3	89.8	10	42	1340	12.7	6.5
Morro de Velosa (2)	194.3	26.5	10	42	1340	3.5	1.8
Punto	P (*)	CP	E	CE	CR	R	%R
Pozo Negro (1)	79.9	47.2	20	42	278	10.5	13.2
Pozo Negro (2)	79.9	25	20	42	278	4.2	5.2
Pájara (1)	115	91.8	20	42	921	10.6	9.2
Pájara (2)	115	53.4	20	42	921	5.8	5.0
Tuineje (1)	113.1	64.5	20	42	350	18.4	16.3
Tuineje (2)	113.1	27.5	20	42	350	6.5	5.7
Tuineje (3)	113.1	27.5	20	42	920	2.5	2.2
Morro de Velosa (1)	194.3	89.8	40	42	1340	11.8	6.1
Morro de Velosa (2)	194.3	26.5	40	20	1340	3.2	1.7

Tabla 3.3.- Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano de cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. C_P , C_E y C_R = contenido mediano en cloruro en la precipitación, escorrentía y el agua de recarga. Concentraciones en $mg L^{-1}$. (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986.

Para el balance de cloruros teniendo en cuenta los aportes de cloruro en cada punto de muestreo de lluvia se tiene:

$$A_p = R C_r$$

Para el cálculo de las aportaciones se ha considerado el valor mediano de la aportación anual obtenida para cada una de las muestras de precipitación. La estimación de las aportaciones de cada estación de muestreo se presenta en el capítulo 4. Al igual que en el cálculo anterior la determinación de la aportación media anual de cloruro se ha realizado de dos maneras: (a) considerando el valor medio de cloruro de todas las muestras de lluvia obtenidas en cada estación de muestreo y (b) descartando las primeras muestras de lluvia del otoño y las muestras de lluvia ocurridas después de un período muy prolongado sin precipitaciones, ya que estas son las que presentan una concentración de cloruro anormalmente alta. El cálculo del valor mediano anual de las aportaciones de cloruro se presenta en el Capítulo 4.

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos para el cálculo de la recarga. Se observa que los valores de recarga obtenidos en algunos puntos son superiores a los obtenidos anteriormente. Este es el caso de punto de Pozo Negro, el cual según este cálculo aumenta considerablemente la estimación de la recarga hasta el 35%, pero con una desviación típica bastante elevada. En el caso de los puntos de Pájara y Tuineje los valores de la recarga obtenidos son bastante próximos a los obtenidos anteriormente. En general la desviación típica realizada en esta estimación es mucho mayor a la obtenida anteriormente y en general superan a los valores calculados.

Punto	P	? P	A _p	? A _p	C _r	? C _r	R (mm)	R (%)	? R
Pozo Negro (1)	79.9	25	7.8	10.7	7.8	0.84	28.17	35.26	38.64
Pozo Negro (2)	79.9	25	6.7	1.7	7.8	0.84	24.20	30.28	6.14
Pájara (1)	115	30	11.75	23.5	25.9	0.56	12.78	11.11	25.56
Pájara (2)	115	30	7	7.8	25.9	0.56	7.61	6.62	8.48
Tuineje (1)	113.1	30	7.2	11.9	9.8	0.84	20.70	18.30	34.21
Tuineje (2)	113.1	30	5.4	5.1	9.8	0.84	15.52	13.72	14.66

Tabla 3.4.- Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano del cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. A_p = aportes de cloruro ($\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$); C_r = contenido medio en cloruro del agua de recarga (meq L^{-1}); $?_P$, $?_{A_p}$ y $?_{C_r}$, = desviación típica de la precipitación, de la aportación de cloruro y de la concentración de cloruro de la recarga. Concentración de la aportación en $\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y concentración de la recarga en meq L^{-1} . (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986. $R = 1000A_p / (35.5 * C_r)$.

Como se presentará en el capítulo 4 se ha realizado la modelación de la composición química del agua freática a partir de la concentración del agua de lluvia, simulando el efecto de la evaporación. Los resultados indican que entre un 75 y 90% del agua de lluvia se

evapora, de tal manera que se puede deducir que la recarga varía entre un 10 y un 25% del agua de la precipitación. Estos resultados resultan también coherentes con los obtenidos en el balance de cloruros.

3.7.- Piezometría

El estudio de la piezometría es fundamental para caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero y para evaluar su evolución en el tiempo. La elaboración de las piezometrías del área de estudio se ha realizado a partir de la caracterización de un acuífero único, en el que existen niveles con distintas permeabilidades.

En este trabajo se ha realizado una recopilación de todos los datos piezométricos obtenidos en investigaciones previas. Estos incluyen datos de los proyectos MAC- 21 (1981), ITGE (1991) y los obtenidos por el autor en esta investigación. Se discute con especial detalle la piezometría obtenida para los años 1980-1982 debido a la gran cantidad de datos utilizados para su elaboración. Las piezometrías de 1989-1990 y de 1998-1999 están bien detalladas para la vertiente oriental del macizo de Betancuria, pero no para la vertiente occidental debido a lo reducido de los datos obtenidos en este sector.

En la delineación de las curvas de isopiezas existe un grado de error importante asociado a la determinación de la cota de las captaciones, ya que fue determinada a partir de mapas topográficos a escala 1:25.000 y en los cuales la equidistancia en las curvas de nivel de estos mapas es de 5 m. Los mapas con las piezometrías elaboradas en este apartado se presentan en el Anejo 3.

Piezometría de 1980-1982

Esta piezometría fue elaborada a partir de los datos del proyecto MAC-21 (1982) y se presenta en la Figura 7 del Anejo 3. La totalidad de los puntos corresponden a pozos de gran diámetro y profundidades que no superan los 80 m. La gran cantidad de puntos reunidos en la elaboración de esta piezometría permite obtener una configuración muy detallada de las isopiezas. Los datos fueron recopilados de las fichas presentadas en el informe y no incluyen ninguna información sobre la metodología de la toma de los mismos. Sin embargo, llama la atención que los valores de profundidad de los pozos y nivel estático medidos estén en cifras cerradas de metros, por lo que es bastante probable que la medición se haya realizado con cinta métrica y plomada.

En el Dominio Occidental la mayoría de los pozos están excavados en rocas volcánicas del Complejo Basal y en algunos casos en rocas intrusivas también del Complejo Basal. En el Dominio Oriental la mayoría de los pozos se encuentran excavados en rocas volcánicas miocenas.

En general se observa que la distribución de la superficie piezométrica sigue aproximadamente la forma de la topografía del terreno. También se observa la continuidad hidráulica entre el Dominio Occidental y el Dominio Oriental. Esta característica permite

asumir que el flujo lateral proveniente del Dominio Occidental continúa después por las rocas volcánicas miocenas del Edificio Gran Tarajal.

A partir de la piezometría obtenida en la vertiente oriental del Macizo de Betancuria se identifican dos sectores de descarga preferencial hacia el mar. El más importante se localiza en el entorno de la localidad de Gran Tarajal y corresponde a las aguas provenientes de las partes altas del Macizo de Betancuria que con un sentido de flujo S-E descienden hasta alcanzar la Depresión Central. En la Depresión Central cambia suavemente el sentido de flujo hacia el Sur, canalizándose aproximadamente por el Valle de Gran Tarajal, para descargar finalmente en el sector de Gran Tarajal. También descarga en este sector el agua que proviene de una elevación piezométrica localizada en los “cuchillos” orientales, la cual desciende con un sentido de flujo S-O hasta alcanzar la Depresión Central (aproximadamente en el Barranco de Gran Tarajal) para posteriormente cambiar el sentido de flujo hacia el sur en el Valle de Gran Tarajal.

El otro punto de descarga preferencial hacia el mar se localiza en el Barranco de Pozo Negro. En la parte norte del área de estudio el agua proviene de la vertiente occidental del Macizo de Betancuria, con un sentido de flujo hacia el Este, y continua su descenso aproximadamente de forma rectilínea, alcanzando la Depresión Central y continuando posteriormente por el Barranco de Pozo Negro. Esta descarga estaría canalizada a través de las rocas volcánicas de la Serie I Inferior, así como en los depósitos detríticos del antiguo aluvial cubierto por las coladas del Malpaís.

En las partes más altas del área de estudio, en rocas del Complejo Basal, el gradiente piezométrico tiende a aumentar paulatinamente hasta alcanzar valores cercanos a 0.03. Este gradiente guarda relación con zonas donde se reconocen rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal y probablemente con zonas donde la recarga es mayor. En la vertiente occidental del Macizo de Betancuria, donde el relieve es más abrupto y predominan rocas intrusivas, el gradiente piezométrico es muy alto y parece tener una continuidad entre las distintas unidades intrusivas.

En las rocas volcánicas del Edificio Gran Tarajal se observan gradientes más bajos (en torno a 0.015), lo que indicaría una mayor permeabilidad de esta unidad volcánica respecto a las rocas del Complejo Basal.

Piezometría 1989-1990

La Figura 8 del anejo 3 presenta la piezometría elaborada con los datos de estos años, procedentes del inventario que llevo a cabo el ITGE (1991). Al comparar la piezometría de este período con la de 1980-1982 se observa que en el área de Tuineje existe un descenso importante del nivel freático, lo que condiciona que las isopiezas se desplacen hacia el oeste en todo este sector. En algunos puntos de este sector el descenso puede ser del orden de los 20 m. Esta mayor profundidad del nivel piezométrico posiblemente este relacionada con el mayor desarrollo de explotaciones de agua subterránea a partir de comienzos de los años

ochenta. Otra posible causa del descenso de los niveles piezométricos en este período respecto al anterior puede estar relacionada con los mayores caudales de explotación de las nuevas captaciones, ya que antes de 1980 en la mayoría de las captaciones se realizaba la explotación por medio de molinos de viento, los cuales no permiten extraer caudales importantes.

Por otro lado, para este mismo período en el sector de Gran Tarajal podría interpretarse que se produce recuperación de los niveles piezométricos, que se traduce en un desplazamiento de las curvas de isopiezas en sentido sur hacia el mar respecto a los niveles medidos en 1980-82. Esta recuperación de los niveles en este sector obedece posiblemente a una menor explotación y paralización de pozos en el sector de Gran Tarajal como consecuencia de la disponibilidad de agua desalinizada para abastecimiento y el progresivo aumento de la salinidad del agua. Esta mayor salinidad podría atribuirse a intrusión salina, como se discutirá en apartados posteriores. En todo caso no resulta extraño un efecto de intrusión marina o de movilización de aguas salinas profundas considerando que en el período 1980-82 se midieron en este sector niveles piezométricos por debajo de -6 ms.n.m.

Los datos piezométricos de este período no permiten reconstruir completamente la piezometría en la vertiente oriental del Macizo de Betancuria.

Piezometría actual (1998-1999)

La piezometría de este período ha sido construida con datos obtenidos íntegramente en esta investigación a lo largo de tres campañas.

En la Figura 9 del anejo 3 se presenta la piezometría elaborada con los datos obtenidos en el período 1998-1999. Al comparar la piezometría de este periodo con la de 1989-1990 se observa una cierta recuperación de los niveles piezométricos en el sector de Tuineje. Esta recuperación se traduce en una disminución del gradiente piezométrico en este sector, así como en una ligera recuperación de los niveles piezométricos. Este fenómeno estaría posiblemente relacionado con el abandono de la explotación de muchas de las captaciones localizadas en este sector. A partir de los antecedentes obtenidos de los propietarios de muchas de estas captaciones, el abandono de las mismas se produjo como consecuencia del empeoramiento en calidad química del agua extraída.

Los datos piezométricos de este período no permiten reconstruir completamente la piezometría en la vertiente oriental del Macizo de Betancuria.

3.8.- Modelo Conceptual

Dominio Occidental

La recarga al sistema se produce de tres modos diferentes: a) por la precipitación en las partes altas del sistema, b) por retornos de riego, principalmente en las partes más bajas y llanas de la Depresión Central y c) por las numerosas presas construidas en la zona y a cotas muy variadas. Dado que la actividad agrícola es muy restringida en la zona y las presas constituyen puntos locales de recarga, el principal mecanismo de recarga corresponde a las

precipitaciones. Una parte de la recarga de la lluvia se produciría principalmente en las partes altas del sistema, donde las precipitaciones son mayores. No obstante, parte importante de las precipitaciones caídas en las partes más altas del Macizo de Betancuria escurren superficialmente hacia zonas más bajas y de menor pendiente. Esto incidiría en que la recarga se produzca en zonas más bajas, donde el agua deja de escurrir o donde queda encharcada al toparse con obstáculos tanto naturales como artificiales.

El agua se infiltra con circulación preferentemente vertical a través del escaso suelo desarrollado en las zonas altas y a través de las fracturas. En su descenso en la zona no-saturada puede encontrar niveles poco permeables, lo que originaría pequeños acuíferos colgados como los observados en Betancuria y que descargan en pequeños manantiales o rezumes. El agua de la recarga desciende hasta alcanzar el nivel de saturación reconocido en las rocas volcánicas de la Unidad Superior. Desde este punto el agua busca la descarga hacia el mar y cambia el flujo de vertical a aproximadamente horizontal.

El modelo conceptual en el Dominio Occidental se encuentra íntimamente relacionado con la estructura geológica del sistema. Por un lado se tienen las rocas volcánicas de la Unidad Superior, las cuales tendrían una permeabilidad relativamente mayor que las rocas intrusivas de la Unidad Inferior. Al situarse espacialmente las rocas volcánicas de permeabilidad mayor sobre rocas intrusivas de menor permeabilidad, posiblemente se condiciona el sistema de flujo vertical del agua subterránea. Este contraste de permeabilidad posiblemente incidiría en la existencia de un nivel de saturación en las rocas volcánicas, inmediatamente por encima las rocas intrusivas de la Unidad Inferior y en un nivel de saturación más profundo reconocido en las rocas intrusivas. Por otro lado se desconoce el papel que desempeñan los diques en la circulación del agua subterránea. A partir de las observaciones realizadas en el manantial del barranco de la Peñitas no se descarta que estas unidades sirvan de dren para las aguas presentes en las rocas intrusivas, lo que posiblemente explicaría los caudales de explotación más altos que se extraen de esta unidad.

Dominio Oriental

El agua subterránea reconocida en el Dominio Oriental procede de dos fuentes principales:

- a) Del flujo lateral proveniente del Dominio Occidental, el cual presenta una continuidad hidráulica con las lavas miocenas. A partir de las características hidroquímicas de las aguas reconocidas en este Dominio se interpreta que el flujo proviene tanto del agua de la Unidad Superior como de la Unidad Inferior.
- b) La recarga directa del agua de lluvia caída en este sector. A partir de los cálculos de la recarga por métodos de balance hidrológico, se espera que ésta sea sólo de unos pocos milímetros anuales. No obstante, no se descarta que esta se produzca principalmente por el agua de escorrentía procedente de las partes altas del Macizo de Betancuria y que se encharca en las partes más bajas y llanas de este sector. El encharcamiento del agua de escorrentía se

produciría cuando el agua que desciende del Macizo de Betancuria, alcanza la Depresión Central, la cual presenta pendientes más bajas. Pero más importante aún para el origen de los encharcamientos resultan los obstáculos tanto naturales (lavas recientes) como artificiales (presas y gavias) que detienen la circulación del agua de escorrentía.

Uno de los sectores donde se han reconocido encharcamientos importantes de agua después de fuertes precipitaciones se localiza en los márgenes de los campos de lavas recientes del Malpaís. Esta unidad volcánica es relativamente nueva y ha rejuvenecido el relieve moderadamente maduro de la isla, lo que ha permitido que se convierta en un importante obstáculo natural al flujo de agua de escorrentía que desciende desde los distintos barrancos, tanto del Macizo de Betancuria como de los “cuchillos” orientales.

Existen pocos indicios en este Dominio que indiquen la existencia de obstáculos importantes al descenso vertical del agua a través de la zona no-saturada. A diferencia de lo observado en el Dominio Occidental, en el Dominio Oriental no se ha reconocido la presencia de acuíferos colgados.

A partir de las características hidroquímicas de las aguas reconocidas en la Serie I Inferior localizadas bajo el campo de lavas recientes del Malpaís, tampoco se descarta una recarga preferencial a través del campo de lavas recientes del Malpaís.