

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

MODELO HIDROGEOQUÍMICO DEL
ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS DEL TEIDE,
TENERIFE, ISLAS CANARIAS

RAYCO MARRERO DÍAZ

LICENCIADO EN GEOLOGÍA
DIVISIÓN DE MEDIO AMBIENTE
INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ENERGÍAS RENOVABLES
GRANADILLA, TENERIFE

TESIS DOCTORAL
REMITIDA PARA EL GRADO DE DOCTOR EN LA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.

BARCELONA
SEPTIEMBRE, 2010

Revisada la presente memoria, estimamos que corresponde fielmente a los resultados obtenidos y quedamos conformes con su presentación en el Departamento D'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya, para ser juzgada por el tribunal que sea asignado.

Y para que conste y surjan los efectos oportunos en cumplimiento de las disposiciones vigentes, extendemos este certificado en:

Dr. Nemesio M. Pérez Rodríguez
Director de la División de Medio
Ambiente del Instituto Tecnológico y
de Energías Renovables (ITER)

Director

Dra. Dina L. López
Departamento de
Geología
Ohio University

Co-directora

Dr. Emilio Custodio
Departamento D'Enginyeria del Terreny,
Cartogràfica i Geofísica
Universita Politècnica de Catalunya

Ponente

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Dr. Nemesio M. Pérez por haberme dado la oportunidad de haberme formado como investigador, incluso desde antes de terminar la licenciatura, en un tema tan interesante como el de la hidrogeología en terrenos volcánicos. Durante todos estos años hemos compartido una intensa relación de la cual, para mí lo más importante ha sido que siempre hemos encontrado la manera de continuar hacia adelante, sobreponiéndonos a las múltiples dificultades que nos hemos encontrado. Esta tesis, es fruto de un compromiso para aumentar y mejorar el conocimiento que se tiene de los recursos hídricos subterráneos en Canarias, y especialmente en la isla de Tenerife, la mayor parte del tiempo sin ningún tipo de financiamiento específico.

En segundo lugar, quiero agradecer a la Dra. Dina L. López, el haber aceptado el reto de la codirección a más de 10000 km de distancia, dedicando el tiempo que a veces no tenía y animándome en los momentos más complicados. Su visión crítica y constructiva en todo el proceso de elaboración y redacción de la tesis, han contribuido sustancialmente en la mejora de la calidad de la misma. Aprovecho para agradecer a la gente del Departamento de Geología de la Ohio University el apoyo y afecto que recibí durante los meses de estancia que compartimos.

Agradezco al "Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica" de la Universitat Politècnica de Catalunya el haber aceptado esta Tesis Doctoral. Quiero hacer una especial mención al Dr. Emilio Custodio, no sólo por realizar las labores de tutoría de este trabajo sino porque su colaboración ha sobrepasado completamente todas las expectativas. Su aportación ha sido fundamental en la fase final de la tesis. Tampoco quiero olvidarme de agradecer a Jordi Sánchez y a Mari Carmen Rodríguez toda la ayuda que me han prestado desde el propio departamento.

Igualmente agradezco al Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología de la Universidad de La Laguna donde se ha desarrollado la primera fase de esta tesis doctoral. De forma especial al Dr. Miguel Ángel Rodríguez por sus labores de tutoría durante ese tiempo.

Quiero agradecer al Dr. Francesco Sortino por su asesoramiento durante las fases de investigación, trabajo de campo y los trabajos analíticos llevados a cabo a lo largo de esta tesis, así como al personal técnico del laboratorio del Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Palermo (Italia), por la realización de los análisis de elementos traza.

Del mismo modo quiero agradecer al Dr. H. Sumino, del Laboratorio de Química de Terremotos de la Universidad de Tokio (Japón), por haber realizado los análisis isotópicos de helio y neón.

En la fase de redacción de la presente tesis, he tenido la oportunidad de conversar y aprender del Dr. Francisco Alcalá, cuyos valiosos e instructivos comentarios quiero agradecer ya que han enriquecido y mejorado la calidad final de la misma.

Agradezco al Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) la información cedida de los análisis físico-químicos de las aguas subterráneas de Tenerife, publicaciones internas, informes, y una parte importante de la información que ha servido de base para elaborar la tesis doctoral. También quiero agradecer a todo el personal la disponibilidad y apoyo que siempre me han brindado, especialmente a Juan Jesús Coello, Isabel Farrujia, Juan José Braojos, Ricardo Balcells y Cecilia García.

Mi agradecimiento a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), especialmente a Ricardo Sanz por su colaboración facilitando los datos meteorológicos.

Para la instalación y mantenimiento de la red de pluviómetros he contado con la colaboración de Maye, el Club Deportivo San Isidro, el Ayuntamiento de Granadilla de Abona, la dulcería Horno de Leña, el Hotel SPA Villalba, la Compañía Cervecera de Canarias, al Parador Nacional del Teide, el Parque Nacional del Teide, Juan Peña, la Comunidad de Aguas de Vergara, el Ayuntamiento de La Guancha, Manuel Hernández.

Quiero hacer también una especial mención a Mari Carmen Ardila, de la que siempre he recibido un gran apoyo y con quién tuve el placer de compartir el trabajo final del CIHS durante el año 2004, el cual ha sido utilizado parcialmente en la presente tesis.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento al apoyo que he recibido a lo largo de todos estos años de mis compañeros de la División de Medio Ambiente del ITER, los que estuvieron desde el principio y los que formaron parte de una etapa determinada: Gladys Melián, Eleazar Padrón, Dácil Nolasco, David Calvo, José Barrancos, Germán Padilla, Margarita Díaz, Fátima Rodríguez, Noemí Lima, Inés Galindo, Pablo González, Pedro Salazar, Gonzalo Auría, Verónica Pérez, Nereida Rancel, Marianela Brito, Celeste Coello, Jenny González y M^a José Delgado. Especialmente a Pedro Hernández, Lourdes Castro y José Salazar, de los cuales heredé un trabajo de varios años. Todos ellos, que han participado directa o indirectamente en esta tesis, acompañándome a las galerías, recogiendo las muestras de agua de lluvia, o analizando las "aguas de Rayco".

Gracias a todos, familia, amigos y compañeros, y especialmente a mi "equipo de becarios": Dácil, Leila, Manolo, Alicia, Iván y Joaquín.

Esta tesis doctoral ha sido realizada gracias al soporte técnico y económico prestado por el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables y el Cabildo Insular de Tenerife.

Dedicado a Paye y
Papaico, de los que he
heredado el interés
por el agua y a los que
me hubiera gustado
preguntarles tantas
cosas...



Sumario

Índice.....	i
Índice de Figuras.....	iv
Índice de Tablas.....	xxvii
Resumen.....	xxxiii
Abstract.....	xxxv

CAPÍTULO I**INTRODUCCIÓN**

1.1.	INTRODUCCIÓN	1
1.2.	OBJETIVOS GENERALES	2
1.3.	ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
1.4.	DATOS BÁSICOS DE TENERIFE	4
	1.4.1. SITUACIÓN Y EXTENSIÓN	4
	1.4.2. FISIOGRAFÍA.....	5
1.5.	MARCO GEOLÓGICO	8
	1.5.1. CANARIAS	8
	1.5.2. TENERIFE	10
	1.5.2.1. Fases constructivas.....	11
	1.5.2.1.1. Escudo basáltico.....	11
	1.5.2.1.2. Volcanismo central.....	13
	1.5.2.1.3. Erupciones históricas	21
	1.5.2.2. Fases destructivas	23
1.6.	MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	24
	1.6.1. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS	29
	1.6.2. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES VOLCÁNICOS	31
1.7.	ÁREA DE ESTUDIO: EL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS DEL TEIDE	33
	1.7.1. CLIMA	34
	1.7.2. GEOLOGÍA	34
	1.7.3. HIDROGEOLOGÍA.....	39
1.8.	INVESTIGACIONES PREVIAS.....	40
	1.8.2. PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA	42
	1.8.3. PLAN HIDROLÓGICO INSULAR (PHI) Y MODELOS.....	44
	1.8.4. SONDEOS DE INVESTIGACIÓN O RECONOCIMIENTOS.....	45
	1.8.5. HIDROGEOQUÍMICAS	45
	1.8.6. ESTUDIOS GEOFÍSICOS	46

CAPÍTULO II**MODELO FÍSICO**

2.1.	INTRODUCCIÓN	49
2.2.	METODOLOGÍA	53
2.3.	GEOMETRÍA DE LA ZONA SATURADA	54
	2.3.1. CALDERA DE LAS CAÑADAS	56
	2.3.1.1. Sondeos de investigación.....	56
	2.3.1.2. Galerías y pozos	60

2.3.1.3. Estudios geofísicos.....	64
2.3.2. VALLE DE ICOD-LA GUANCHA	71
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
2.4.1. CALDERA DE LAS CAÑADAS	77
2.4.2. VALLE DE ICOD-LA GUANCHA	79
2.4.3. CONEXIÓN CON LOS MATERIALES PRE-CAÑADAS SUBYACENTES	80
2.4.4. DIQUES	81
2.4.5. MODELO FÍSICO FINAL.....	83

CAPÍTULO III

GEOQUÍMICA DE LA RECARGA

3.1. INTRODUCCIÓN	85
3.2. SISTEMÁTICA DEL MUESTREO DE LA PRECIPITACIÓN.....	87
3.3. REPRESENTATIVIDAD DE LOS RESULTADOS.....	91
3.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN	98
3.5. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN	114

CAPÍTULO IV

GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1. INTRODUCCIÓN	129
4.1.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA HIDROGEOQUÍMICA DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS.....	131
4.1.2. CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS DE LAS ROCAS DEL MEDIO POROSO DE LA ZONA DE ESTUDIO	133
4.2. DATOS UTILIZADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO.....	136
4.2.1. DATOS OBTENIDOS EN EL PRESENTE ESTUDIO.....	136
4.2.1.1. Sistemática del muestreo del agua subterránea en las campañas de campo.....	138
4.2.2. BASE DE DATOS HIDROQUÍMICA DE LAS CAÑADAS (BDHLC).....	142
4.2.3. DATOS DE LA ZONA DE ESTUDIO	142
4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS.....	154
4.3.1. ANÁLISIS MULTIVARIANTE: MATRIZ DE CORRELACION Y ANÁLISIS DE CLUSTER	167
4.3.2. CONTENIDO CATIONICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	182
4.3.3. CONTENIDO ANIÓNICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	185
4.3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE DIFERENTES PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	188
4.3.5. RELACIONES IÓNICAS.....	229

CAPÍTULO V**GEOQUÍMICA DE LOS GASES DISUELTOS**

5.1.	INTRODUCCIÓN	353
5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS GASES DISUELTOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	355
5.3.	ANTECEDENTES: ESTUDIOS PREVIOS DE GASES EN EL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS.....	363
5.4.	SISTEMÁTICA DEL MUESTREO DE GASES DISUELTOS	369
5.5.	RESULTADOS.....	380
	5.5.1. GASES DISUELTOS NO RADIATIVOS	380
	5.5.2. GASES DISUELTOS RADIATIVOS	406
	5.5.3. RELACIONES ISOTÓPICAS $3\text{He}/4\text{He}$ y $4\text{He}/20\text{Ne}$	412
5.6.	DISCUSIÓN	421

CAPÍTULO VI**BALANCE HÍDRICO**

6.1.	INTRODUCCIÓN	426
6.2.	BALANCE HÍDRICO DEL CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (CIATFE).....	428
6.3.	BALANCE DE MASAS DE CLORUROS	433
6.4.	DISCUSIÓN	448

CAPITULO VII**MODELO HIDROGEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS**

7.1.	INTRODUCCIÓN	450
7.2.	METODOLOGÍA	450
7.3.	GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS	452
7.4.	MODELO CONCEPTUAL.....	454
7.5.	CONCLUSIONES GENERALES	470
7.6.	FUTUROS TRABAJOS.....	472

REFERENCIAS	474
--------------------------	------------

ANEXOS	501
---------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Marco geográfico regional de las Islas Canarias donde también se pueden observar los archipiélagos de Madeira y Las Salvajes y los montes submarinos cercanos (en letras blancas). [www.earth.google.es].	4
Figura 1.2. Mapa de Tenerife con las principales características fisiográficas comentadas en el texto. Curvas de nivel cada 100 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N	5
Figura 1.3. Foto de un sector de la pared de los Acanilados de Los Gigantes en el T.M. de Santiago del Teide que forman parte del Macizo Basáltico de Teno. Se puede apreciar claramente la infinidad de diques que atraviesan las coladas basálticas y los depósitos de piroclastos, con algún nivel de almagre intercalado (color rojizo). [www.webtenerife.com].	6
Figura 1.4. Mapa de isoyetas elaborado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife con la pluviometría media anual del periodo 1986/87-1992/93. [www.aguasdeterife.org].....	7
Figura 1.5. Mapa mundial de los continentes y placas tectónicas con la posición de Canarias en el interior de la placa africana (recuadro amarillo).	8
Figura 1.6. Mapa de las Islas Canarias con la edad entre paréntesis de las rocas más antiguas que se han datado del vulcanismo subaéreo (a partir de Guillou et al., 2004). Se observa claramente que la edad de las islas disminuye hacia occidente. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	9
Figura 1.7. Cuadro cronoestratigráfico de Tenerife en el que se puede observar las principales fases constructivas y destructivas de la isla desde el Mioceno hasta la actualidad (modificado de Galindo, 2005).	11
Figura 1.8. Mapa geológico simplificado de Tenerife donde además se representan el sistema de dorsales (líneas rojas) con los centros eruptivos asociados (círculos grises) y las lavas de las erupciones históricas (en rojo). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	12
Figura 1.9. Esquema simplificado de la estratigrafía del Edificio Cañadas a lo largo de toda la pared de la Caldera de Las Cañadas (ver mapa de situación en el recuadro inferior izquierdo). Modificado de Galindo (2005), según Martí et al. (1994).	14
Figura 1.10. Mapas de los afloramientos actuales del Edificio Cañadas diferenciando entre Grupo Inferior (Lower Group) y Grupo Superior (Upper Group). A su vez el Grupo Superior ha sido subdividido en tres formaciones ordenadas cronológicamente como: Ucanca, Guajara y Diego Hernández. Extraído de Cas et al. (2005). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	15
Figura 1.11. Mapa topográfico de la caldera de Las Cañadas y del Valle de Icod-La Guancha donde se han representado los límites del deslizamiento lateral de Las Cañadas, tanto la parte visible (trazo discontinuo grueso) como la inferida por varios autores (trazo discontinuo fino) (Navarro, 1995; Carracedo, 2007a). También se han dibujado las trazas de las galerías de agua de la zona (en rojo) y de la galería Rio de Guia (azul). EC: El Cedro; BT: Boca de Tauce; RDG: Roques de García; G: Guajara; MT: Montón de Trigo; LA: La Angostura; LP: Las Pilas; DH: Diego Hernández; EP: El Portillo; VLO: Valle de La Orotava; F: Fortaleza; MB: Montaña Blanca; T: Teide; PV: Pico Viejo. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	16
Figura 1.12. Corte geológico simplificado de la caldera de Las Cañadas del Teide y del Valle de Icod-La Guancha, según el modelo de deslizamiento lateral. (Modificado de Martí, 2004). Ubicación del corte en la 1.11.	17
Figura 1.13. Detalle de un afloramiento del "mortalón" realizada durante una visita al interior de una galería del Valle de Icod-La Guancha. Se puede observar claramente los clastos de diferentes tamaños (de color más oscuros) embebidos en la matriz arcillosa (de color más claro). El forro de una cámara de fotos sirve de escala.	17

Figura 1.14. Mapa de sombras de la caldera de Las Cañadas con los límites sobreimpuestos de las tres calderas de colapso (líneas continuas) y de los valles de deslizamientos (líneas discontinuas). Modificado de Martí y Gudmundsson (2000). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.....	18
Figura 1.15. Corte geológico simplificado de la caldera de Las Cañadas del Teide y del Valle de Icod-La Guancha, según el modelo de colapso vertical. (Modificado de Martí, 2004). Ubicación del corte en Figura 1.13.	18
Figura 1.16. Vista satélite de la caldera de Las Cañadas y del CTPV en su margen septentrional. Fuente: NASA. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. PC: Pico Cabras.	19
Figura 1.17. Mapa de sombras de Tenerife donde se representan con diferentes colores las coladas de lava de las 4 erupciones históricas y las anomalías térmicas de superficie detectadas por el IGME en sus estudios de prospección geotérmica (IGME, 1983-1993d). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.....	21
Figura 1.18. Foto de uno de los centros de emisión (Siete Fuentes) de la erupción histórica de Siete Fuentes-Fasnia-Arafo en 1704-1705. Se puede observar a la izquierda los dos conos de cinder y a la derecha la pequeña colada lávica emitida de color más oscuro.....	23
Figura 1.19. Disponibilidad y consumo de agua en la isla de Tenerife (en $\text{hm}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) según el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) en el año 2004. [www.aguastenerife.org].	25
Figura 1.20. Mapa de Tenerife en el que se ha representado las captaciones de aguas subterráneas (pozos y galerías) y los manantiales. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.....	26
Figura 1.21. Evolución temporal del caudal total extraído por las galerías y pozos del agua subterránea a nivel insular. Extraído de Farrujia et al. (2006).	26
Figura 1.22. Zonificación Hidrogeológica de la isla de Tenerife según el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (modificado del PHI, 1996).	27
Figura 1.23. Mapa de isopiezas de Tenerife en el año 1925 (rojo) cada 100 m, donde se puede apreciar que se asemeja razonablemente bien a la topografía insular. Fuente: CIATFE. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	28
Figura 1.24. Mapa de isopiezas de Tenerife en el año 1925 (rojo) y en el 1997 (azul) cada 100 m, donde se puede apreciar el descenso generalizado del nivel freático. Fuente: CIATFE. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	28
Figura 1.25. Mapa de los afloramientos en superficie de las formaciones hidrogeológicas Miocénicas y Post-Miocénicas de Tenerife. [www.grafcan.es]. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.....	29
Figura 1.26. Cortes hidrogeológicos ideales de tres ambientes volcano-estructurales presentes en Tenerife (modificado de Navarro y Farrujia, 1989). Ver explicación en el texto. En B y C se puede advertir la sobreelevación del nivel freático en el núcleo de la dorsal debido a que es la zona de mayor intrusión de diques.....	33
Figura 1.27. Mapa geológico del área de estudio donde se ha representado los límites de la Zona III (línea negra discontinua). Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. (GRAFSCAN).	36
Figura 1.28. Principales características volcano-estructurales de la zona central de Tenerife (modificado de Ablay y Martí, 2000). EC: El Cedro; BT: Boca de Tauce; U: Llano de Ucanca; RDG: Roques de García; G: Guajara; MT: Montón de Trigo; LA: La Angostura; LP: Las Pilas; DH: Diego Hernández; EP: El Portillo; F: Fortaleza; MB: Montaña Blanca; MM: Montaña Majúa; T: Teide; PV: Pico Viejo. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.....	37
Figura 1.29. Detalle del afloramiento de "Los Azulejos", que es un buen ejemplo de fenómenos de alteración hidrotermal residual en el ámbito de Las Cañadas. Localización de la foto: cruz amarilla en la Figura 1.28.	39

- Figura 1.30. Ubicación de los sondeos realizados por el Ministerio de Obras Públicas (MOPU) y la UNESCO para el proyecto SPA-15 (cuadrados naranjas), los realizados por el CIATFE (cuadrados azules) y el sondeo profundo TF-1 con fines geotérmicos realizado en el año 1992 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1993) (cuadrado verde). Curvas de nivel (cada 50 m) y carretera principal en azul y malva, respectivamente. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 41
- Figura 1.31. Síntesis de zonas anómalas en las aguas subterráneas según el estudio de exploración geotérmica llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España. Extraído de IGME (1983-1993e)..... 43
- Figura 1.32. Izquierda: anomalías termales en las aguas subterráneas de Tenerife en relación con el volcanismo histórico; las áreas sombreadas indican temperaturas superiores a los 28°C. Derecha: anomalías de concentración de SiO₂ y de la temperatura de equilibrio, inferida a través del geotermómetro albita-anortita, en las aguas subterráneas de Tenerife. Extraído de Valentin et al., 1990..... 44

CAPÍTULO II

- Figura 2.1. Imagen digital tridimensional de Tenerife orientada desde el norte hacia el sur, sobre la que se ha dibujado el límite de la Zona III, representado por una línea roja, así como los principales accidentes geográficos que la delimitan. Ver más explicación en el texto. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. [www.earth.google.es/]..... 49
- Figura 2.2. Modelo teórico del flujo de agua subterránea en el acuífero de Las Cañadas según la hipótesis de deslizamiento lateral (modificado de Navarro, 1995)..... 51
- Figura 2.3 Cortes hidrogeológicos esquemáticos del acuífero de Las Cañadas del Teide, en función de las diferentes hipótesis sobre el origen de la caldera: 1: deslizamiento lateral; 2: colapso vertical. Ubicación del corte en la Figura 2.2. T: Teide. 52
- Figura 2.4. Mapa geológico de Las Cañadas, con la ubicación de las galerías (líneas negras, con círculo azul que representa la bocamina), pozos (círculos blancos) y los 6 sondeos de investigación perforados en Las Cañadas (cuadrados), así como los puntos de medida de AMT y MT (círculos amarillos) y de SP (círculos verdes) de Pous et al. (2002) y Aubert y Kieffer (1998), respectivamente. Línea discontinua negra: pared de Las Cañadas; línea blanca: carreteras principales. Rectángulos azul y amarillo: localización de la Figura 2.7. y 2.8., respectivamente. Más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 55
- Figura 2.5. Reconstrucción de las columnas de los sondeos realizados en Las Cañadas a partir de los informes litológicos y/o paleomagnéticos del propio proyecto (para los del SPA-15) o de Soler et al. (2004) (para los del CIATFE) y del estudio de Ablay y Martí (2000), columnas derecha e izquierda, respectivamente. La posición relativa de los sondeos en esta figura coincide con su distribución siguiendo relativamente bien (excepto para S-1) el perímetro sur de la caldera en el sentido opuesto a las agujas del reloj. Línea discontinua negra: contacto teórico entre materiales Pre- y Post-Cañadas según Ablay y Martí (2000). También se ha incluido la cota a la que se encontró agua en el momento de la perforación en los diferentes sondeos (línea discontinua y valores en azul, en m.s.n.m.) 57
- Figura 2.6. Evolución del nivel piezométrico entre 1993 y 2007 en los sondeos S-1 (verde) y S-2 (rojo), junto a la precipitación mensual promedio (en decenas de mm) de las estaciones meteorológicas de la AEMET C405G y C406G ubicadas en Las Cañadas. 59
- Figura 2.7. Mapa geológico (arriba) y corte hidrogeológico (abajo) del límite suroccidental del acuífero de Las Cañadas del Teide. En el mapa geológico (ver ubicación en Figura 2.4.) se puede observar la traza en rojo del tramo que atraviesa materiales Post-Cañadas cada una de las galerías representadas en el corte (en negro), con su número correspondiente, así como el resto de galerías de la zona (en azul). También se han indicado la traza de las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA). En el corte hidrogeológico se han representado el sondeo exploratorio C-2 y 7 galerías de las cuales se posee información geológica e hidrogeológica, así como la cota

- inferida del nivel freático, en m.s.n.m. (línea azul punteada). Línea negra discontinua: contacto inferido entre materiales Pre-Cañadas y Post-Cañadas. Ver más explicación en el texto..... 61
- Figura 2.8. Mapa de la mitad oriental de Las Cañadas (ver ubicación en la Figura 2.4.) con los puntos de medida de SP (en verde y rojo) indicando la cota aproximada de la superficie SPS inferida, junto a las galerías de la zona (traza malva) y a los sondeos S-1 y S-2 con la cota del nivel piezométrico medida en cada uno de ellos (en m.s.n.m.), según Farrujia et al. (2004). El círculo azul representa la cota del nivel piezométrico en la galería Nº 16 (BVA). Modificado de Aubert y Kieffer, (1998)..... 65
- Figura 2.9. Mapa de sombras de Las Cañadas y el CTPV donde se han representado los puntos de medida de AMT y MT de Pous et al. (2002) (círculos) así como la localización de los perfiles del propio trabajo (líneas naranjas) y la de los nuevos perfiles elaborados en la presente tesis (líneas violetas) utilizando dichos datos. También se ha representado la cabecera del deslizamiento de La Orotava (DLO) y los límites de las tres posibles calderas de colapso vertical, ambos según Martí y Gudmundsson (2000). Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N..... 66
- Figura 2.10. Modelos en 2-D de los perfiles de MT (estrellas) y AMT (triángulos) en la Caldera de Las Cañadas. De Pous et al. (2002). 67
- Figura 2.11. Perfiles de AMT y MT en el interior de Las Cañadas donde sólo se ha representado la capa conductiva (menor de 50 Ω m). Elaborados a partir de los datos publicados por Pous et al. (2002). Ubicación de los perfiles en la Figura 2.9., más explicación en el texto. Perfiles: U (Ucanca); P (Parador); T (Teide); M (Medio); RV (Risco Verde); F (Fortaleza). G: Guajara, RDG: Roques de García. 70
- Figura 2.12. Mapa de sombras del acuífero de Las Cañadas, con las galerías, pozos y sondeos utilizados para la reconstrucción de la geometría de la zona saturada (los números se corresponden con los de la Tabla A.2.1.). Círculos verdes: atraviesan materiales del Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) y "mortalón"; círculos amarillos: atraviesan CTPV sin observarse "mortalón"; círculos rosados: no atraviesan CTPV. Línea azul discontinua: morfología del "mortalón" según Márquez et al. (2008); línea azul continua: trazado del corte de la Figura 2.13.; línea negra: escarpes visibles de la pared de la caldera. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 73
- Figura 2.13. Corte hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas, desde Guajara hasta la costa del Valle de Icod-La Guancha. Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte: línea azul en la Figura 2.12. 74
- Figura 2.14. Mapa geológico de Las Cañadas donde se han representado los cortes hidrogeológicos de las Figuras 2.15. (línea amarilla) y 2.16. (línea azul). También se han incluido los puntos de medida de los estudios de geofísica de Aubert y Kieffer (1998) y Pous et al. (2002) (círculos verdes y amarillos, respectivamente) junto a las galerías (líneas negras y rojas) y pozos (círculos blancos y naranjas) del área de estudio así como los 6 sondeos de investigación perforados en Las Cañadas (cuadrados naranjas y azules). T: Teide; MB: Montaña Blanca. Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 76
- Figura 2.15. Corte hidrogeológico de Las Cañadas a través de los 6 sondeos de investigación junto a la intersección con las galerías procedentes de la periferia de Las Cañadas (círculos) e información de los estudios geofísicos de Aubert y Kieffer (1998) y de Pous et al. (2002). RDG: Roques de García; MB: Montaña Blanca. Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte: línea amarilla en la Figura 2.14. 77
- Figura 2.16. Corte hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas, modificado de la Figura 2.13., junto a los datos de los estudios de Pous et al. (2002) y Márquez et al. (2008), y la configuración final del zócalo impermeable (línea blanca rayada). Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte en figura 2.14. 79
- Figura 2.17. Centros eruptivos y posibles alineamientos volcánicos en la Caldera de Las Cañadas, junto a las galerías de la zona. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 82

Figura 2.18. Mapa del acuífero de Las Cañadas donde se han representado las principales características del modelo físico final. Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 84

CAPÍTULO III

- Figura 3.1. Mapa de sombras de Tenerife con la ubicación de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis, indicados en color rojo los de la vertiente sur y en amarillo los de la vertiente norte. ... 88
- Figura 3.2. Foto del pluviómetro Nº 22 (P22) y esquema general en sección de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis. 89
- Figura 3.3. Ubicación de los pluviómetros instalados en la presente tesis (ITER) y aquellos de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) con los que se han comparado los resultados de precipitación obtenidos. La línea amarilla marca el límite de la Zona III según el CIATFE (PHI, 1996). Curvas topográficas cada 50 metros. 91
- Figura 3.4. Desviación (en %) de los valores medios de precipitación mensual de los pluviómetros instalados en la presente tesis respecto a la media de los pluviómetros de la AEMET (ver Tabla 3.1.), en función de la altitud y para cada vertiente. Los números corresponden con cada pluviómetro de la Tabla 3.1. La máxima diferencia del P22 no es representativa dado que el periodo de observación fue tan sólo de octubre de 2005 a abril de 2006. 93
- Figura 3.5. Datos de precipitación (en mm) durante el periodo de muestreo de los pluviómetros Nº 9 (P9), 21 (P21), 5 (P5), 11 (P11), 2 (P2), 3 (P3), 4 (P4) y 22 (P22) instalados en la presente tesis (líneas verdes, amarillas y violetas), en comparación con la de los pluviómetros C406G, C451U, C469C, C428L y C427E de la AEMET (líneas azules), ubicados relativamente próximos a cada uno de ellos (ver Figura 3.3. para localización). También se ha representado la precipitación promedio interanual de los respectivos pluviómetros de la AEMET (líneas rojas). 95
- Figura 3.6. Variación altitudinal de la precipitación media mensual (mm/mes) en los 22 pluviómetros instalados en las vertientes norte (rojo) y sur (amarillo) de Tenerife en la presente tesis, frente a las precipitaciones promedio de los pluviómetros de la AEMET, tanto de la vertiente norte (malva) como de la vertiente sur (verde). La precipitación media mensual de los pluviómetros instalados en la presente tesis corresponde con el promedio de los valores mensuales durante el periodo de muestreo (septiembre de 2005 a febrero de 2007). Se puede observar en ambas vertientes una tendencia ascendente de las precipitaciones con la altitud hasta los 1000-1500 m.s.n.m., a partir de los cuales se estabilizan. Ver más explicación en el texto. 96
- Figura 3.7. Histogramas de la distribución de valores de pH y conductividad eléctrica (C.E.) de las muestras de agua de lluvia analizadas en todos los pluviómetros instalados en la isla de Tenerife en la presente tesis (ver Tabla A.3.1.). N=número de muestras; Desv.Est: desviación estándar; $r = \text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$ 99
- Figura 3.8. Diagrama de probabilidad acumulada de la concentración (en $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$) de Na, K, Ca, Mg, HCO_3 , Cl, SO_4 y NO_3 de las muestras de agua de lluvia analizadas en todos los pluviómetros instalados en la presente tesis (ver Tabla A.3.1.). 100
- Figura 3.9. Perfil altitudinal de las concentraciones de cloruros (izquierda) y sodio (derecha) en las aguas de lluvia de la vertiente norte (rojo) y sur (amarillo) de la isla de Tenerife durante el mes de noviembre de 2005. En ambas vertientes se observa claramente una correlación inversa del contenido en cloruros y sodio con la altitud y, por lo tanto, con la lejanía a la costa. 101
- Figura 3.10. Diagrama bilogarítmico de la conductividad eléctrica frente a la concentración de sodio (Na) y cloruros (Cl) en las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis de investigación. Se puede observar una buena correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido en ambos iones, aunque ésta disminuye cuando la conductividad eléctrica es baja debido al dominio de otros iones. 101
- Figura 3.11. Diagrama de Schoeller-Berkaloff de la composición química media del mar (según Goldbert, 1961) y de la composición química media ponderada de las muestras de agua de lluvia

- analizada de cada uno de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis (Tabla 3.3.). Cuadrados: vertiente sur; Rombos: vertiente norte. 103
- Figura 3.12. Mapa de situación de los 22 pluviómetros con la composición química promedio ponderada de las muestras de agua de lluvia representada según el diagrama de "Stiff modificado". El pluviómetro P1 tiene un color naranja diferente al resto para resaltar que presenta una concentración anormalmente elevada en casi todos los iones, e indicando que estos resultados han sido tomados sólo como aproximativos a lo largo de la presente tesis. 104
- Figura 3.13. Evolución temporal de la precipitación mensual y la conductividad eléctrica de las muestras de agua de lluvia en los pluviómetros P15 (izquierda) y P3 (derecha), ubicados aproximadamente a la misma altura (800 m.s.n.m.) en las vertientes norte y sur de Tenerife, respectivamente. Se puede observar claramente en ambos casos el aumento en la conductividad eléctrica del agua tras el periodo de estiaje. 106
- Figura 3.14. Variación de la concentración promedia ponderada mensual de cloruros en el agua de lluvia respecto a la altitud en ambas vertientes de Tenerife (TF) obtenida en la presente tesis. También se ha representado dicha variación en las aguas de lluvia de Gran Canaria (GC) en las vertientes norte y sur de la isla (ver ubicación de los puntos de muestreo en el mapa insertado, de Custodio, 2009a), a partir de los datos de Gasparini et al. (1990). 107
- Figura 3.15. Diagrama de Piper de la composición química media ponderada de las muestras de agua de lluvia de los pluviómetros instalados en la presente tesis y de la composición química media del mar (según Goldbert, 1961). Círculos: vertiente sur; cuadrados: vertiente norte. Ver texto para más explicación. 107
- Figura 3.16. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) respecto a la altitud o cota de cada pluviómetro, en las vertientes norte y sur de Tenerife. También se han representado el valor del pluviómetro P1 (cuadrado rojo), las líneas de tendencias que marcan los gradientes altitudinales y los coeficientes de regresión (R^2) para las serie de valores de cada vertiente (líneas roja y amarilla), así como la posible existencia de un aumento del gradiente en ambas vertientes por debajo de los 700 m.s.n.m. (línea azul). 112
- Figura 3.17. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) respecto a la distancia a la cumbre en las vertientes norte y sur de Tenerife. También se han representado el valor del P1 (cuadrado rojo) y las líneas de tendencias que marcan los gradientes longitudinales (líneas roja y amarilla) y los coeficientes de regresión (R^2) para las serie de valores de cada vertiente, así como la posible existencia de un aumento del gradiente (línea verde clara, norte verdes; línea verde oscuro, sur). 112
- Figura 3.18. Mapa de situación de todas las muestras (de la presente tesis y de trabajos previos) de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}\text{O}$ en las precipitaciones de Tenerife, separadas en función de su ubicación en 5 grupos: vertiente norte, vertiente sur, cumbre, noreste y sureste. Los números y los grupos corresponden con los de las Tablas 3.6. y 3.7. Líneas negras: curvas de nivel cada 500 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 117
- Figura 3.19. Relación de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}\text{O}$ en las precipitaciones de Tenerife. Cuadrados verdes: datos (nieve con signo "-") de estudios previos; Círculos: lluvia de septiembre (rojo), octubre (azul) y noviembre (amarillo) de 2005 obtenidos en la presente tesis (vertientes norte: + y sur: x). 118
- Figura 3.20. Relación de la composición isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ (izquierda) y del δD (derecha) en el agua de lluvia respecto a la cantidad precipitada en ambas vertientes entre los meses de septiembre y noviembre de 2005. Se observa que las muestras más pesadas corresponden al mes de septiembre donde las precipitaciones fueron menores. No se disponen de datos de cantidad precipitada en las muestras procedentes de los estudios previos y, por tanto, no han sido representados. 119
- Figura 3.21. Variación espacial y temporal de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD del agua de lluvia en cada pluviómetro instalado en la presente tesis. Los valores negativos del eje de abscisas

	indica la distancia a la cumbre de la vertiente norte y los triángulos indican la cota de cada pluviómetro (que coincide con la vertical en el eje superior del contenido isotópico).....	120
Figura 3.22.	Relación de la composición isotópica promedio ponderada de δD y $\delta^{18}O$ en las aguas de lluvia analizada en la presente tesis así como de la composición isotópica de las precipitaciones (lluvia y nieve) de estudios previos cuyo exceso de deuterio fuera igual o superior a +10 (‰ vs V-SMOW). Línea negra: nueva línea meteórica local (LML): $\delta D=7,7 \cdot \delta^{18}O+13,4$; línea azul: línea meteórica mundial (LMM): $\delta D=8 \cdot \delta^{18}O+10$ (Craig, 1961).	122
Figura 3.23.	Gradientes altitudinales (δ -altitud) obtenidos a partir de los datos de estudios previos (con símbolo "+") y de la composición isotópica promedio ponderada del agua de lluvia de la Tabla 3.8. para la vertiente sur (verde) y la vertiente norte (rojo), así como para la zona de cumbre (amarillo).	123

CAPÍTULO IV

Figura 4.1.	Mapa geológico simplificado de la zona central de Tenerife. Ver más explicación en el texto. Curvas de nivel cada 50 metros. Proyección UTM (m), WGS84 28N. (www.grafcan.com). ...	134
Figura 4.2.	Mapa de la zona central de Tenerife donde se ha representado la ubicación, según la zonificación hidrogeológica del CIATFE (líneas punteadas), de los puntos de muestreo en las campañas de campo de los años 2004 y 2006. Los círculos rosados representan el frente o zona más profunda de la galería en los 11 puntos de muestreo en los que se pudo entrar y tomar la muestra de la propia surgencia. La línea negra rayada que marca los límites de la Zona III coincide con el acuífero de Las Cañadas. También se han representado los centros eruptivos de las erupciones históricas. La numeración se corresponde con la Tabla 4.2.. Los datos del caudal extraído, que se corresponden con el dato más actual disponible, se han representando en el frente de cada obra de captación. Ver más explicación en el texto. Curvas de nivel cada 50 metros. Proyección UTM (m), WGS84 28N.	137
Figura 4.3.	Foto del frente de la galería Nº 59 (FVE) en el que se localizaba la principal surgencia y en el que se realizó el muestreo de las aguas subterráneas.....	139
Figura 4.4.	Mapa de sombras de la zona central de Tenerife con la ubicación de los 49 puntos de muestreo seleccionados del acuífero de Las Cañadas, cuyos límites se han tomado a partir de la zonificación hidrogeológica del CIATFE (PHI, 1996). Los puntos de muestreo del Nº 1 al 38 (en verde) están en la Zona III, mientras que del Nº 39 al 49 (en naranja) representan las 11 galerías de las zonas limítrofes que podrían estar drenando aguas del acuífero. Proyección UTM (m), WGS84 28N.	143
Figura 4.5.	Mapa de la zona central de Tenerife donde se han representado los 74 puntos de aguas subterráneas seleccionados en el presente estudio, agrupados por las diferentes regiones. También se han representado los centros eruptivos históricos y los 3 manantiales de la parte alta de Arico muestreados en el año 2004. La numeración corresponde con la Tabla 4.2. Los datos del caudal extraído, que corresponden con el dato más actual disponible, se han representando en el frente de cada obra de captación (círculos azules). Ver más explicación en el texto. Curvas de nivel cada 50 metros. Proyección UTM (m), WGS84 28N.	145
Figura 4.6.	Histograma del Error del Balance Iónico (IBE) de los 351 análisis disponibles en los 49 puntos de muestreo seleccionados del acuífero de Las Cañadas.	149
Figura 4.7.	Evolución temporal del caudal total de agua subterránea extraído en 16 obras de captación ubicadas en el acuífero de Las Cañadas. Los registros de caudal de los años 1973, 1979 y 1985 se realizaron durante los proyectos SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975), MAC-21 y AGUA-2000, respectivamente.	150
Figura 4.8.	Histograma del Error de Balance Iónico (IBE) de las 74 aguas subterráneas seleccionadas de la Tabla 4.5	152

- Figura 4.9. Diagramas de Schoeller-Berkaloff para la clasificación hidroquímica de las 74 aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. Todos los diagramas tienen la misma escala vertical para que puedan ser comparados entre sí..... 155
- Figura 4.10. Diagrama de Langelier-Ludwig en el que se ha aislado el anión HCO_3^- (que se entiende como $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) para la clasificación hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes, subdivididas en función de la región a la que pertenecen según la Figura 4.5. Y Tabla 4.5..... 157
- Figura 4.11. Diagramas de Stiff modificados de la composición iónica de las muestras de agua subterránea de los 74 puntos seleccionados del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. Se han diferenciado tres facies hidroquímicas diferentes: Na-HCO_3 , Mg-Ca-HCO_3 y Mg-Na-HCO_3 . En el caso de las galerías los diagramas se han representado en la parte más profunda o frente, y el caudal drenado (del año 1997) se ha representado en la boca o entrada de la misma. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 159
- Figura 4.12. Perfil A-A' de la zona de estudio (ubicación en Figura 4.11.) donde se han representado los diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas. Facies hidroquímicas: Na-HCO_3 (amarillo) y Mg-Ca-HCO_3 (azul). Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad; Líneas marrones verticales y sub-verticales discontinuas: diques asociados al Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) sólo válidos con carácter cualitativo. 161
- Figura 4.13. Perfil B-B' de la zona de estudio (ubicación en Figura 4.11.) donde se han representado los diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas. Facies hidroquímicas: Na-HCO_3 (amarillo) y Mg-Na-HCO_3 (verde). Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. No se han representado las trazas de las galerías de la cabecera del Valle de La Orotava cuya orientación es perpendicular al trazado del perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad; Líneas marrones verticales y sub-verticales discontinuas: diques asociados al Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) sólo válidos con carácter cualitativo. 162
- Figura 4.14. Perfil C-C' de la zona de estudio (ubicación en Figura 4.11.) donde se han representado los diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas. Sólo la facie hidroquímica Na-HCO_3 (amarillo) está presente en este perfil. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad; Líneas marrones verticales y sub-verticales discontinuas: diques asociados al Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) sólo válidos con carácter cualitativo. 163
- Figura 4.15. Perfil D-D' de la zona de estudio (ubicación en Figura 4.11.) donde se han representado los diagramas de Stiff modificados de las aguas subterráneas. Facies hidroquímicas: Na-HCO_3 (amarillo) y Mg-Na-HCO_3 (verde). Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad; Líneas marrones verticales y sub-verticales discontinuas: diques asociados al Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) sólo válidos con carácter cualitativo. 164
- Figura 4.16. Diagrama binario de la Alcalinidad Total ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) frente a la concentración de Na, K y Mg (todos en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) en todas las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes de la Tabla 4.5. 168
- Figura 4.17. Dendograma de casos resultantes de la aplicación del CA a los 38 casos o puntos de muestreo y las 39 variables o elementos de la Tabla 4.7 y 4.8. El grado de similitud o distancia de asociación entre los diferentes grupos de casos se obtuvo a través del método de Ward, mientras que la distancia entre casos se calculó a través de la distancia euclidiana, ambos

mediante el software STATISTICA®. La línea roja horizontal separa los dos grandes grupos de casos.....	174
Figura 4.18. Mapa de distribución espacial en planta de los 74 puntos de la zona de estudio en los que se han diferenciado los 38 puntos (o casos) seleccionados de la Tabla 4.7 y 4.8., agrupados en función de los resultados del Análisis Cluster (CA). Curvas de nivel cada 50 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	175
Figura 4.19. Dendograma de variables resultante de la aplicación del CA a los 19 casos del grupo A. El grado de similitud o distancia de asociación entre los diferentes grupos de variables se obtuvo a través del método de Ward, mientras que la distancia entre variables se calculó a través del coeficiente de correlación de Pearson (r), a través de la ecuación $d=1-r$, ambos mediante el software STATISTICA®. Las líneas horizontales de diferentes colores separan los distintos grupos y subgrupos de variables. Ver más explicación en el texto.	177
Figura 4.20. Dendograma de variables resultante de la aplicación del CA a los 19 casos del grupo B. El grado de similitud o distancia de asociación entre los diferentes grupos de variables se obtuvo a través del método de Ward, mientras que la distancia entre variables se calculó a través del coeficiente de correlación de Pearson, a través de la ecuación $d=1-r$, ambos mediante el software STATISTICA®. Las líneas horizontales separan los distintos grupos y subgrupos de variables. Ver más explicación en el texto.	178
Figura 4.21. Detalle de un diagrama triangular de la concentración relativa de rCa, rNa+K y rMg de las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis. En la Figura A.4.2. del Anexo A.4. se han representado las aguas subterráneas de las diferentes regiones en diagramas ternarios separados para una mejor observación de los diferentes procesos. Ver más explicación en el texto.	181
Figura 4.22. Detalle del diagrama triangular de la concentración de HCO ₃ -Cl-SO ₄ en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. En la Figura A.4.3. del Anexo A.4. se han representado las aguas subterráneas de las diferentes regiones en diagramas ternarios separados para una mejor observación de los diferentes procesos. Ver más explicación en el texto.	184
Figura 4.23. Diagrama binario del pH medido en el campo (pH campo) en función del pH medido en el laboratorio (pH laboratorio).....	187
Figura 4.24. Histogramas de los valores de pH de campo y de laboratorio en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis. Existen 20 puntos de muestreo de los cuales no se dispone de datos de pH de campo, que en su mayoría pertenecen a los datos seleccionados de estudios anteriores (datos históricos).....	188
Figura 4.25. Mapa de distribución espacial en planta del pH de campo (superior) y de laboratorio (inferior) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N.	189
Figura 4.26. Distribución espacial vertical (perfiles señalados en la Figura 4.25.) de pH (en °C) medido en el laboratorio, en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad....	190
Figura 4.27. Diagrama binario de la temperatura del aire frente a la temperatura del agua (ambos en °C) en cada punto de muestreo del que se dispone información. La mayoría de las aguas subterráneas de las que se disponen datos presentan una temperatura mayor que la temperatura ambiente en el punto de muestreo.....	192
Figura 4.28. Histograma de los valores de temperatura (en °C) de las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis.....	193

Figura 4.29. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la temperatura en °C, de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	195
Figura 4.30. Diagrama binario de la conductividad eléctrica del agua medida en el campo frente a la medida en el laboratorio, ambas en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, corregida a 25°C, en cada punto de muestreo del que se dispone información. También se ha representado el ajuste por mínimos cuadrados de todos los valores (línea negra) y la recta de pendiente igual a 1 (línea azul).	198
Figuras 4.31 y 4.32. Histogramas de los valores de conductividad eléctrica de campo, ambos en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, corregida a 25°C, de las aguas subterráneas analizadas.	198
Figura 4.33. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la conductividad eléctrica de laboratorio, en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, corregida a 25°C, de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	199
Figura 4.34. Histograma del contenido en sílice (H_4SiO_4) disuelta (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis.	202
Figura 4.35. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la sílice disuelta (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	203
Figura 4.36. Histograma de alcalinidad total (HCO_3+CO_3) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de HCO_3) en las aguas subterráneas analizadas.	205
Figura 4.37. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil señalados en el mapa, de la alcalinidad total en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de HCO_3 , de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	206
Figura 4.38. Histograma de la concentración de cloruros (Cl) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas.	208
Figura 4.39. Mapa de distribución espacial en planta y en perfiles señalados en el mapa, de la concentración de cloruros (Cl) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	209
Figura 4.40. Histogramas de la concentración de sulfatos (SO_4) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas.	212
Figura 4.41. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil señalados en el mapa, de la concentración de sulfatos (SO_4) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos	

	(verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	213
Figura 4.42.	Histogramas de la concentración de nitratos (NO_3) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas.....	216
Figura 4.43.	Mapa de distribución espacial en planta y en perfil señalados en el mapa, de la concentración de nitratos (NO_3) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	216
Figura 4.44.	Mapa de los tipos de usos del suelo de la zona de estudio. Se puede observar que en general las posibles fuentes contaminantes relacionadas con la actividad antrópica (aguas residuales urbanas o retornos de riego de cultivos) están restringidas a la franja costera de la isla. Curvas de nivel cada 50 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Fuente: Gobierno de Canarias (www.grafcan.es).	220
Figura 4.45.	Histograma de la concentración de fluoruros (F) (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis.	221
Figura 4.46.	Mapa de distribución espacial en planta y en perfil señalados en el mapa, de la concentración de fluoruros (F) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	222
Figura 4.47.	Diagrama binario del contenido de P_2O_5 (en % en peso) y F (en ppm) en los diferentes tipos de rocas que forman el Complejo Teide-Pico Viejo. Círculos: valores medios recopilados por Brändle y Bellido (2000); Cuadrados: de Ablay et al. (1998). El contenido en F de las rocas del CTPV presenta una buena correlación con la concentración de P_2O_5 , indicando que posiblemente el F se encuentre mayoritariamente en forma de fluoroapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$]...	225
Figura 4.48.	Diagramas binarios de la concentración de F ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) frente a los índices de saturación (IS) de la fluorita (CaF_2), calcita (CaCO_3) y fluoroapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$] calculados con el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999), en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. En el caso del diagrama con fluoroapatito, sólo se han representado aquellas aguas en las que hay valores con concentraciones detectables de PO_4 disuelto.	225
Figura 4.49.	Representación en un diagrama TAS de la composición química relativa de Na, K y Si en las rocas utilizadas en el modelado hidrogeoquímico	229
Figura 4.50.	Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la relación $r(\text{Na}+\text{K})/r(\text{Ca}+\text{Mg})$ en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad.	230
Figura 4.51.	Diagrama binario de la concentración de $r(\text{Ca}+\text{Mg})$ frente a la de $r(\text{Na}+\text{K})$ en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. También se han representado los valores de $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$ de la disolución isoquímica de la fonolita (con pendiente 0,4) y del basalto (con pendiente 4,2) típicos del CTPV como términos finales de los materiales del medio poroso del acuífero de Las Cañadas (Araña et al., 1989; Alonso y Quesada, 1989; Tabla 4.11.). La flecha negra indica el valor de $r(\text{Ca}+\text{Mg})/r(\text{Na}+\text{K})$ igual a 1.	232

- Figura 4.52. Sección de la galería Nº 28 (SFN) extraído de Rodríguez et al. (2008) donde se muestra la composición y la edad de los materiales que rellenan el Valle de Icod-La Guancha, desde los materiales fonolíticos más evolucionados de las últimas erupciones del CTPV hasta los depósitos de avalancha del deslizamiento lateral, llamado localmente "mortalón", que formaron dicho valle. 233
- Figura 4.53. Diagrama binario de la concentración de Na frente a la de K (ambos en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. También se han representado las relaciones $r\text{Na}/r\text{K}$ típica del agua de mar (con pendiente 47) (Goldstein, 1966) y de la disolución isoquímica de una fonolita (con pendiente 2,6) y un basalto (con pendiente 3,1) típicos del CTPV como términos finales de los materiales del medio poroso del acuífero de Las Cañadas (Araña et al., 1989; Alonso y Quesada, 1989; Tabla 4.10.). Las flechas negras indican los valores de $r\text{Na}/r\text{K}$ igual a 8,5 (superior) y 19 (inferior). Ver más explicación en el texto. 234
- Figura 4.54. Diagrama binario de la concentración de Mg frente a la Alcalinidad Total (HCO_3+CO_3) (ambos en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) en todas las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes, agrupadas por regiones. 235
- Figura 4.55. Diagrama binario semi-logarítmico de la relación $r\text{Cl}/r(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)$ frente a la altitud (en m.s.n.m.) en todas las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes, agrupadas por regiones. Las flechas negras indican posibles tendencias entre las aguas subterráneas del Valle de Icod-La Guancha. 237
- Figura 4.56. Diagrama bilogarítmico de la concentración de Cl (en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) frente a la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ en las aguas subterráneas y en las aguas de lluvia analizadas en la presente tesis. También se ha incluido el valor de la relación en el agua de mar (0,11) a partir de Custodio y Llamas (1976; 1983). 238
- Figura 4.57. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. 239
- Figura 4.58. Diagrama bilogarítmico de la concentración de Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) frente a la relación molar de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (R) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes de la Tabla 4.12., así como todas las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis (en función de la vertiente: rojo-norte, amarillo-sur) cuyo contenido en bromuro está por encima del límite de detección del equipo ($50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). También se ha representado el valor de R en el agua de mar (655 ± 4) (línea azul discontinua) así como la posición en el diagrama de una muestra típica de agua de mar (según Goldbert, 1961). 245
- Figura 4.59. Diagrama semi-logarítmico de la concentración de NO_3 (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) frente al valor de la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (R), en las aguas subterráneas de la Tabla 4.12. La línea azul punteada indica el valor típico marino de R (655 ± 4) y la franja marrón el rango de valores de R en las aguas subterráneas contaminadas por plaguicidas ricos en Br (296 ± 35) según Alcalá y Custodio (2008b). 248
- Figura 4.60. Diagramas semi-logarítmicos de la concentración de Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) frente a la relación molar de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (R) en las aguas subterráneas de la Tabla 4.12. Diagrama superior: agrupadas por región a la que pertenecen. Diagrama inferior: agrupadas por altitud (triángulos: cumbre; cuadrados: medianía; rombos: litoral) y por el origen o proceso que controla la salinidad (Evapo: evapoconcentración; R: recarga; M: mezcla; G: gases; A: agrícola; E: efecto de aridez climática; D: desconocido). También se ha representado el valor de la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ en el agua de mar (655 ± 4) (línea azul discontinua) así como la posición en el diagrama de una muestra típica de agua de mar (según Goldbert, 1961). Ver más explicación en el texto. 249

- Figura 4.61. Distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) de la relación rCl/rBr en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Los tres letras sobre cada punto de muestreo coincide con la columna "Sigla" de la Tabla 4.12. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Los números corresponden a la columna N° en la Tabla 4.12. 250
- Figura 4.62. Diagrama triangular de la concentración relativa de $rBr-rCl-rB$ en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes de la Tabla 4.12. Los diferentes colores son función de los proceso identificados a partir de otros iones presentes en el agua (i.e. nitrato) y de la relación rCl/rBr descritos en la Figura 4.60. También se ha representado la composición típica de una muestra de agua de mar, según Goldbert (1961). Ver más explicación en el texto. 253
- Figura 4.63. Diagrama bilogarítmico de la relación rB/rBr frente a la relación rCl/rBr (R) en las aguas subterráneas de Tenerife presentes en la BDHLC, agrupadas en función de la altitud del punto de muestreo (en m.s.n.m.), siguiendo el mismo criterio que el descrito anteriormente: litoral: entre 0 y 500; mediania: entre 500 y 1000; cumbre: por encima de 1000 m.s.n.m.. Las aguas subterráneas relacionadas con el acuífero de Las Cañadas de la Tabla 4.12. se han representado con el símbolo correspondiente de "tesis". También se ha representado el valor de R en el agua de mar (655 ± 4) (línea azul discontinua) y la posición en el diagrama de una muestra típica de agua de mar (según Goldbert, 1961). Ver más explicación en el texto..... 254
- Figura 4.64 Diagrama bilogarítmico de la relación rCl/rBr (R) frente a la relación rB/rBr en las aguas subterráneas de Tenerife presentes en la BDHLC, agrupadas en función de la altitud del punto de muestreo (en m.s.n.m.), siguiendo el mismo criterio que el descrito anteriormente: litoral: entre 0 y 500; medianía: entre 500 y 1000; cumbre: por encima de 1000 m.s.n.m.. Las aguas subterráneas de la Tabla 4.X. se han representado con el símbolo correspondiente de "tesis". También se ha representado el valor de una muestra típica de agua de mar (según Goldbert, 1961). Ver más explicación en el texto. 255
- Figura 4.65. Diagrama binario de la temperatura (en °C) del agua subterránea frente a la concentración de la sílice disuelta (SiO_2). También se han trazado las líneas de solubilidad de las diferentes fases de la sílice. Ver más explicación en el texto. 262
- Figura 4.66. Diagrama binario de la temperatura de muestreo del agua subterránea y de la temperatura de equilibrio calculada según el geotermómetro de la calcedonia (ecuación 4.6.)..... 263
- Figura 4.67. Diagrama binario de la temperatura de equilibrio calculada según el geotermómetro de la calcedonia (ecuación 4.6.) y la altitud del punto de muestreo de las aguas subterráneas de la Tabla 4.13., agrupadas por regiones. 264
- Figura 4.68. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalado en el mapa) de la temperatura de equilibrio obtenida a través del geotermómetro de la calcedonia (ecuación 4.6.) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes de la Tabla 4.13.. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad 265
- Figura 4.69. Diagrama binario de la temperatura de equilibrio calculada según el geotermómetro de la relación iónica K/Mg (t_{km}) (ecuación 4.15.) y la altitud del punto de muestreo. 267
- Figura 4.70. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalado en el mapa) de la temperatura de equilibrio obtenida a través del geotermómetro de la relación iónica K/Mg (t_{km}) (ecuación 4.15.) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes de la Tabla 4.13.. Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados

- sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad 268
- Figura 4.71. Diagramas binario $\text{Log}(a\text{SiO}_2)$ vs $\text{Log}(a\text{Na})+\text{pH}$ y vs $\text{Log}(a\text{K})+\text{pH}$ en los que se han representado las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis agrupadas por regiones y los campos de estabilidad mineral de los equilibrios $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (superior) y $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (inferior) a 25 °C y 1 bar (izquierda) y a 150 °C y 50 bares (derecha). Líneas rayadas verticales: líneas de solubilidad del cuarzo (a) y de la sílice amorfa (b). Fuente: Bowers et al. (1984). 272
- Figura 4.72. Diagramas binario $\text{Log}(a\text{SiO}_2)$ vs $\text{Log}(a\text{Ca})+2\text{pH}$ y vs $\text{Log}(a\text{Mg})+2\text{pH}$ en los que se han representado las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis agrupadas por regiones y los campos de estabilidad mineral de los equilibrios $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (superior) y $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (inferior) a 25 °C y 1 bar (izquierda) y a 150 °C y 50 bares (derecha). Líneas rayadas verticales: líneas de solubilidad del cuarzo (a) y de la sílice amorfa (b). Fuente: Bowers et al. (1984). 274
- Figura 4.73. Diagrama triangular de la concentración de HCO_3^- -Cl- SO_4 en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. También se ha representado la muestra de condensado de las fumarolas del Teide (Albert-Beltrán et al., 1989. 1990). Figura inferior: detalle de la figura superior. Modificado de Giggenbach (1991). 276
- Figura 4.74. Diagrama $10 \text{ cK} / (10 \text{ cK} + \text{cNa})$ versus $10 \text{ cMg} / (10 \text{ cMg} + \text{cCa})$ de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes, agrupadas por regiones. También se representa la evolución, en función de la temperatura (en grados centígrados), de la composición química de una solución en equilibrio con una roca promediada de la corteza, recristalizada isoquímicamente y termodinámicamente estable (línea negra). C: concentración o actividad. Figura inferior: detalle de la figura superior. Modificado de Giggenbach (1988). 278
- Figura 4.75. Diagrama Mg-Na-K en el que se han representado todas las muestras de aguas subterráneas analizadas en la presente tesis agrupadas por la región a la que pertenezcan, así como una muestra promedio típica del agua del mar (Goldbert, 1961). Tanto t_{kn} (líneas continuas) como t_{km} (líneas discontinuas) son isotermas que indican las diferentes temperaturas de equilibrio (en °C). Las líneas azul y violeta representan las soluciones resultantes de la disolución isoquímica de las rocas fonolítica y basáltica del medio poroso del acuífero de Las Cañadas, respectivamente. Figura inferior: detalle de la figura superior. Modificado de Giggenbach (1988)..... 281
- Figura 4.76. Diagrama frente a . La concentración de cada especie (c_i) se expresa en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. El contenido en CO_2 de la fases líquida y vapor (líneas naranjas y verdes respectivamente) es función de la fugacidad de CO_2 ($f\text{CO}_2$, en bares) y de la temperatura de equilibrio del geotermómetro t_{km} . Las líneas roja y azul representan la disolución isoquímica del basalto y de la fonolita, respectivamente, en función de la masa de roca disuelta (en gramos). Modificado de Giggenbach, 1988..... 283
- Figura 4.77. Diagrama binario de la temperatura del agua (°C) frente al índice de saturación (IS) de la calcita (CaCO_3) calculado con el PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999), en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. La banda gris indica que, dadas las incertidumbres en los análisis, se considera que un agua está en equilibrio con la calcita si tiene un IS entre -0,5 y +0,5..... 286
- Figura 4.78. Índices de saturación calculados con el programa CHILLER (Spycher y Reed, 1990a) de las diferentes fases minerales y del CO_2 (gas) en las aguas subterráneas del sondeo S-1 a 18 y 80 °C..... 292
- Figura 4.79. Diagrama semi-logarítmico de la cantidad de fonolita agregada (en gramos) frente a la evolución del pH y de la concentración de los aniones y cationes mayoritarios en la solución resultante de la interacción entre las aguas del sondeo N° 1 (S-1) y la fonolita, a una $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3,5}$ bares. El HCO_3^- expresa el carbono inorgánico disuelto total o TDIC. 293

- Figura 4.80. Diagrama $10 \text{ cMg}/(10 \text{ cMg} + \text{cCa})$ versus $10 \text{ cK}/(10 \text{ cK} + \text{cMg})$ de la composición química de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. También se ha representado la solución resultante de la disolución isoquímica de 10 gramos de las rocas basálticas y fonolíticas usadas en la interacción, así como la evolución de la solución resultante de las interacciones entre el sondeo S-1 con el basalto y la fonolita, a $10^{-3,5}$ bares de presión parcial de CO_2 (líneas rosa y naranja, respectivamente). También se ha indicado en cada solución la cantidad (en gramos) de roca agregada a la simulación. Línea negra: evolución, en función de la temperatura (en grados centígrados), de la composición química de una solución en equilibrio con una roca promediada de la corteza, recristalizada isoquímicamente y termodinámicamente estable. c: concentración o actividad. Figura inferior: detalle de la figura superior. Ver más explicación en el texto. Modificado de Giggenbach (1988). 294
- Figura 4.81. Diagrama $10 \text{ cMg}/(10 \text{ cMg} + \text{cCa})$ versus $10 \text{ cK}/(10 \text{ cK} + \text{cMg})$ similar al de la Figura 4.X. en el que se ha representado también la evolución de la solución resultante de las interacciones entre el sondeo S-1 con el basalto y la fonolita, a $10^{-3,5}$ bares de CO_2 (líneas rosa y naranja) y a 50 bares de CO_2 (líneas roja y azul), respectivamente. Figura inferior: detalle de la figura superior. c=concentración o actividad. Ver más explicación en el texto. Modificado de Giggenbach (1988). 295
- Figura 4.82. Diagrama bilogarítmico de la cantidad de roca agregada (en gramos) frente a la evolución del pH y de la concentración de los aniones y cationes mayoritarios en la solución resultante de la interacción entre las aguas del sondeo N° 1 (S-1) y la fonolita (superior) y el basalto (inferior), a una $P_{\text{CO}_2} = 50$ bares. El HCO_3 expresa el carbono inorgánico disuelto total o TDIC. 296
- Figura 4.83. Principales procesos modificadores de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) en las aguas respecto a la línea meteórica local. 299
- Figura 4.84. Diagrama binario de la relación δD y $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis. Se ha representado la composición típica del agua de mar (SMOW) y de la fase vapor condensada de las fumarolas del cráter del Teide (Albert-Beltran et al., 1989, 1990). También se han representado a modo comparativo los campos composicionales de las aguas meteóricas, fluidos hidrotermales y aguas magmáticas, tanto andesíticas como basálticas, según Allard (1983), Giggenbach (1992b) y Chiodini (2006). 302
- Figura 4.85. Diagrama binario de la relación δD y $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas en función de la región a la que pertenecen. También se ha representado la nueva línea meteórica local de Tenerife (LMLTF: $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+15,5$) y la composición isotópica promedio ponderada del agua de lluvia en las vertientes norte y sur de Tenerife, ambas estimadas en el capítulo 3 de la presente tesis. Se indica la altura (en m.s.n.m.) de cada uno de los pluviómetros, tanto de la vertiente sur (azul) como de la vertiente norte (rojo). Los óvalos engloban los puntos de muestreo de aguas subterráneas de un mismo grupo. Dado que el error analítico de cada dato es muy reducido y no modifica prácticamente la interpretación de los mismos, éste se ha omitido. 303
- Figura 4.86. Concentración de cloruros en función de la relación de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs V-SMOW) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis. También se ha representado la composición típica del agua de mar ($\text{Cl}=536 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$; $\delta^{18}\text{O}=0$ ‰) y la composición promedio ponderada del agua de lluvia tanto de cloruros como de $\delta^{18}\text{O}$ en ambas vertientes de Tenerife, obtenida en el capítulo 3 de la presente tesis. Líneas punteadas: líneas de mezcla teóricas entre la composición típica del agua de mar y las aguas de lluvia a diferentes altitudes; línea rayada: posible curva de evaporación cualitativa. Ver más explicación en el texto. 306
- Figura 4.87. Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) del contenido isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y δH (‰ vs SMOW) de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis de la Tabla 4.16.. También se han representado los pluviómetros instalados en la presente tesis a partir de los cuales se han obtenido los promedios ponderados de la composición isotópica del agua de lluvia de las Figuras 4.85. y 4.86. Curvas de nivel cada 50 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 308

- Figura 4.88. Perfiles verticales (señalados en la Figura 4.87.) del contenido isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes de la Tabla 4.16.. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. 309
- Figura 4.89. Diagrama binario de la composición isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs SMOW) frente a la altitud en las aguas subterráneas de la Tabla 4.16., agrupadas en función de las diferentes regiones. Las rayas rojas representan la altura de la superficie en la vertical del punto de muestreo (en m.s.n.m.). Los cuadrados rosa representan la altura del área de recarga (h) estimada a partir del gradiente altitudinal obtenido por Custodio et al. (1987): $\delta^{18}\text{O} = -0,00243 \cdot h - 2,20$. En la Tabla 4.16. se presenta un resumen de los diferentes datos representados en esta figura. Ver más explicación en el texto. 311
- Figura 4.90. Diagrama binario de la temperatura del agua (en °C) frente a la cota de recarga calculada de las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis, agrupadas por regiones. Notar que existe un incremento de temperatura a mayor cota del área de recarga calculada en las regiones de la Dorsal Sur (flecha negra), Arico (flecha azul) y Valle E (flecha verde). 313
- Figura 4.91. Diagrama binario de la diferencia entre la cota de recarga calculada y el punto de muestreo frente a la conductividad eléctrica de laboratorio (en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ a 25 °C) en las muestras de aguas subterráneas de la Tabla 4.16.. Los diferentes colores representan: 1. Azul: aguas de recarga con un bajo tiempo de tránsito; amarillo: aguas con un corto tiempo de residencia y una fuerte interacción agua-roca; verde: aguas de una larga circulación pero en tiempo de residencia corto; rojo: larga circulación y posible mezcla de aguas de recarga local y aguas con un mayor tiempo de residencia; blanco: mezcla de los diferentes procesos. Ver más explicación en el texto. 313
- Figura 4.92. Esquema de las variaciones del $\delta^{13}\text{C}$ en la naturaleza, especialmente de aquellos compuestos de interés en el ciclo hidrológico (modificado de Mook, 2002). 318
- Figura 4.93. Correlación entre los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (‰ VPDB) respecto a la altitud en las muestras de fluidos terrestres de Tenerife: círculos: gases en la atmósfera de las galerías y del pozo; rombos: fumarolas del Teide. Las galerías "Hondura de Luchón (HLN)" y "San Isidro" poseen un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ entre -10 y -11 ‰ que, junto a los relativamente altos valores de concentración de metano (CH_4), indican mezcla de CO_2 volcánico con una componente biológica importante, posiblemente debido a un bosque sepultado por las coladas y cenizas de las erupciones recientes y/o históricas. Ver más explicación en el texto. Modificado de Albert-Beltran et al. (1989). 321
- Figura 4.94. Mapa de los puntos de muestreo con valores del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ y TDIC de las aguas subterráneas de la Tabla 4.17.. Se ha indicado con diferentes colores el trazado de las galerías en función de la localización del punto de la toma de la muestra: azul: muestra tomada en surgencia; rosa: muestra tomada en bocamina; naranja: muestras tomadas por Custodio et al. (1987) en las que siempre se tomó en la surgencia. Las tres letras en cada punto corresponden con la columna de "Sigla" en la Tabla 4.17. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. Curvas de nivel cada 50 metros. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 325
- Figura 4.95. Histograma de la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ en las aguas subterráneas de la Tabla 4.17. 325
- Figura 4.96. Valores de la concentración del TDIC y de las diferentes especies carbonatadas disueltas (en $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) calculadas mediante el programa de especiación química PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) en las aguas subterráneas muestreadas en la campaña de 2006 de la Tabla 4.17. Las tres letras de cada punto corresponden con la columna "Sigla" de la Tabla 4.17.. *Se ha incluido el dato del sondeo N° 1 (S-1) de Soler et al. (2004). 327
- Figura 4.97. Relación entre el $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ y la concentración del carbono inorgánico disuelto total (TDIC) en las aguas subterráneas de la Tabla 4.17.. Las tres letras de cada punto corresponden con la

	columna de "Sigla" en la Tabla 4.17. Círculos: aguas del acuífero de Las Cañadas; rombos: aguas que no pertenecen al acuífero de Las Cañadas. Rojo y amarillo: presente estudio (referencia A); naranja y azul: Custodio et al. (1987) (referencia B); verde: Soler et al. (2004) (referencia C). Las líneas rojas delimitan aproximadamente las diferentes poblaciones I, II y III. Ver más explicación en el texto.	328
Figura 4.98.	Mapa de distribución espacial en planta y en perfil (señalados en el mapa) del contenido isotópico de $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ (‰ vs V-PDB) de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes analizadas en la presente tesis (Tabla 4.17.). Planta: curvas de nivel cada 50 m; Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Perfil: Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. No se ha representado el perfil C-C' por falta de datos suficientes. En el mapa en planta y en el perfil B-B' no se ha representado el valor de $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ del punto de muestreo N° 63 (MEO) (-12,82 ‰) para poder identificar diferencias de menor orden entre las aguas subterráneas del resto de puntos.	329
Figura 4.99.	Comparativa entre la concentración del carbono inorgánico disuelto total (TDIC) en las aguas subterráneas de 25 de los 39 puntos de muestreo en los años 1994, 1997 y a lo largo del periodo 1991-2001. La mayoría de las galerías muestran pequeñas diferencias de concentración del TDIC.	337
Figura 4.100.	Mapa de sombras del acuífero de Las Cañadas del Teide, zonificado en función del PHI (1996), donde se han representado las 37 galerías y los 2 sondeos seleccionados para el cálculo de la descarga controlada de CO_2 . La elipse representa el área superficial del estudio de desgasificación difusa de Hernández et al. (1997). Ver más explicación en el texto.	338
Figura 4.101.	Evolución de la altura del nivel piezométrico en los sondeos N°1 (S-1) y 2 (S-2) medido por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE). Es importante destacar la diferente escala de cada eje.	340
Figura 4.102.	Variación lineal de la tasa de desgasificación de CO_2 (en $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) en función del caudal de agua drenado ($\Phi\text{H}_2\text{O}$) a partir de los datos empíricos de las galerías de la Tabla 4.19. (puntos negros y línea negra continua). También se han representado las diferentes curvas teóricas de desgasificación (líneas negras discontinuas) asumiendo una P_{CO_2} de la atmósfera de la galería de (A) 1% y (B) 11% y con diferentes rangos de los diversos parámetros. TDIC: concentración del carbono inorgánico total disuelto, en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; CAT: concentración de Ca + Mg, en $\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$; L: longitud de la galería, en metros; S: sección del canal (anchura x profundidad), en cm^2 . Los números en azul corresponden con los datos de las galerías de la Tabla 4.19.. Los puntos rojo y amarillos corresponden con los datos de la galería N° 28 (SFN) de la Tabla 4.20. Ver más explicación en el texto.	345
Figura 4.103.	Gráfico del factor F de desgasificación de CO_2 (en $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) en función de la distancia al alumbramiento principal (en metros) de los tramos considerados en la Tabla 4.20. Se observa que el valor del factor F se ajusta con una correlación de 0,999 a un comportamiento logarítmico en función de la distancia.	347

CAPÍTULO V

Figura 5.1.	Mecanismos de emisión de gases endógenos en un volcán. Una fracción de los gases generados por el magma y/o por el sistema volcánico-hidrotermal, queda atrapado (disuelto) en las aguas subterráneas del acuífero	353
Figura 5.2.	Esquema de los principales procesos e interacciones que tienen lugar entre las diferentes esferas que afectan a la composición química e isotópica final de los gases disueltos en un acuífero volcánico.	356
Figura 5.3.	Series radiactivas: (a) ^{238}U , generación del isótopo ^{222}Ra (Radón); (b) ^{232}Th , generación del isótopo ^{220}Ra (Torón) y (c) ^{235}U , generación del isótopo ^{219}Ra (Actinón).....	360

Figura 5.4. Esquema de generación de las fumarolas sumitales en el Teide. Se distinguen tres zonas diferenciadas en el ascenso de gases: A: Zona de enfriamiento de gases magmáticos por conducción en las paredes y vaporización en la circulación fisural hasta saturación; B: Zona no saturada donde se produce enfriamiento por conducción de las paredes y posible pérdida de agua por condensación; C: Zona de vaporización del acuífero local (colgado) en posición indeterminada en el edificio postcaldera y donde probablemente se da un enfriamiento adiabático en sistema abierto. El ascenso de gases se representa con diversos tipos de flechas (en la parte inferior izquierda): 1: incorporación de ligeras cantidades de aguas procedentes de la circulación fisural regional; 2: gases endógenos; 3: mezcla de gases con vapor. En Albert-Beltrán et al. (1989).	363
Figura 5.5. Modelo de funcionamiento de las emanaciones gaseosas de Tenerife. Ver más explicación en el texto. En Valentin et al., (1989).	364
Figura 5.6. Foto del interior de la galería Nº 5 (LGA) en el sector occidental de Las Cañadas, donde se pueden apreciar los precipitados de carbonato cálcico de color blanquecino en sus paredes y techo, así como la tubería de ventilación (abajo izquierda) para introducir aire "limpio" del exterior de la galería y/o extraer el aire "contaminado" por las emanaciones gaseosas del interior de la misma.	366
Figura 5.7. Relación de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{34}\text{S}$ en el sulfato precipitado (Pp SO_4) de las diferentes fuentes o reservorios primarios de azufre. Modificado de Clark y Frintz, (1997). Círculos verdes: composición isotópica de los sulfatos disueltos en las aguas subterráneas de cuatro galerías de Tenerife (de Valentín et al., 1989).	367
Figura 5.8. Mapa de Canarias con la edad geológica de las rocas subaéreas datadas más antiguas de cada isla junto a los valores de $^3\text{He}/^4\text{He}$ en los fluidos terrestres de Canarias (modificado de Pérez et al., 1994).	368
Figura 5.9. Localización de los puntos de muestreo de los gases disueltos en las aguas subterráneas del presente estudio. Todos los puntos corresponden a galerías excepto el pozo Nº 17 (FLO), en la zona próxima a la costa en el Valle de Icod-La Guancha. También se ha indica con una "F" el punto de muestreo de las fumarolas del cono sumital del Teide, que corresponde con el punto más elevado del Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV). Los números de cada punto de muestreo coinciden con la Tabla 5.4. También se han representado los centros eruptivos históricos (con el año d.C. entre paréntesis). Proyección UTM (m), WGS84 28N	369
Figura 5.10. Llave de presión y tapones (izquierda) para sellar la botella de vidrio (derecha) con la muestra de agua subterránea para el análisis de los gases disueltos no radiactivos.	372
Figura 5.11. Metodología para el muestreo de los gases disueltos en las aguas según el método descrito por Capasso e Inguaggiato (1998): a) introducción del gas almacén en la botella; b) restauración de la presión atmosférica en la botella; c) extracción de la fase gaseosa tras alcanzar el equilibrio con la fase líquida. Ver más información en el texto	373
Figura 5.12. Valores del Coeficiente de Bunsen (β) y de la Constante de Henry (K_H) en función de la temperatura, según Benson y Krause (1976).....	375
Figura 5.13. Sistema cerrado para la extracción y medida "in situ" de la actividad del Radón (^{222}Rn) disuelto en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas, donde se puede observar el módulo de extracción con la membrana capilar enrollada alrededor de la pared interna, el espectrómetro alfa portátil y el ordenador portátil para descargar la información.	376
Figura 5.14. Esquema de la metodología seguida para el muestreo de los isótopos de He y Ne en el agua subterránea que se alumbraba en el interior de las galerías de la zona central de Tenerife.	378
Figura 5.15. Ejemplo de un diagrama de probabilidad acumulada de Sinclair (1974) en el que se diferencian dos poblaciones superpuestas (fondo y pico) que forman una intermedia.....	379
Figura 5.16. Localización de los puntos de muestreo de los gases disueltos en las aguas subterráneas de la presente tesis (cuadrados amarillos) y de los gases de la atmósfera de las galerías (cuadrados	

- verdes), medidos en estudios previos. Los números de cada punto corresponden con los de la Tabla 5.6.. En el caso de los puntos Nº 97, 98 102, 103, 104, 105 y 111 , éstos coinciden con los puntos Nº 54, 50, 43, 16, 13, 61 y 42, respectivamente. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 385
- Figura 5.17. Mapa de distribución de la concentración de CO₂ (gas) disuelto en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife según la Tabla 5.6. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. n.d. o n.m.: no detectado o no medido. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 386
- Figura 5.18. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.17. para ubicación) donde se han representado los datos de CO₂ (gas) disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.17.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.6.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto. 387
- Figura 5.19. Mapa de distribución de la concentración de CO disuelto en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife según la Tabla 5.6. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. n.d. o n.m.: no detectado o no medido. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 389
- Figura 5.20. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.19. para ubicación) donde se han representado los datos de CO (gas) disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.19.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.6.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto. 390
- Figura 5.21. Mapa de distribución de la concentración de CH₄ disuelto en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife según la Tabla 5.6. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. n.d.: no detectado. Proyección UTM (m), WGS84 28N..... 391
- Figura 5.22. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.21. para ubicación) donde se han representado los datos de CH₄ (gas) disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.21.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.6.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto. 392
- Figura 5.23. Fotografía de detalle de los precipitados en el techo de la galería Nº 5 (LGA) en la que se observaron aguas subterráneas con concentraciones relativamente elevadas de CH₄, CO y CO₂, y reducidas de O₂..... 394

- Figura 5.24. Mapa de distribución de la concentración de H_2 disuelto en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife según la Tabla 5.6. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. n.d. o n.m.: no detectado o no medido. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 395
- Figura 5.25. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.24. para ubicación) donde se han representado los datos de H_2 (gas) disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.X.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.6.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto. 396
- Figura 5.26. Mapa de distribución de la concentración de He disuelto en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife según la Tabla 5.6. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. n.d. o n.m.: no detectado o no medido. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 398
- Figura 5.27. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.26. para ubicación) donde se han representado los datos de He (gas) disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.26.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.6.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto. 399
- Figura 5.28. Diagrama ternario modificado de Giggenbach y Matsuo (1991) de la concentración relativa de Ar, N_2 y He en las muestras de gases disueltos en las aguas subterráneas de la presente tesis (círculos con números que corresponden con la Tabla 5.6.), junto a los gases de las manifestaciones volcánico-hidrotermales de Canarias (Tabla 5.7., de Pérez et al., 1992a), la concentración típica de los gases de la componente mantélica (BASALTO) y de subducción-cortical (ANDESITA-CORTICAL), del aire (AIRE) y del agua saturada en aire (ASA). Las líneas negras representan las líneas de mezcla entre los diferentes reservorios y la línea amarilla punteada el rango de composición de los gases de la componente de subducción-cortical. ... 401
- Figura 5.29. Diagrama ternario modificado de Giggenbach (1990) de la concentración relativa de N_2 , CO_2 y CH_4 en las muestras de gases disueltos en las aguas subterráneas de la presente tesis y de los gases en la atmósfera de las galerías publicada por IGME (1983-1993e) y Valentin et al. (1989) (círculos y rombos respectivamente, con números que corresponden con la Tabla 5.6.), junto a los gases de las manifestaciones volcánico-hidrotermales de Canarias (Tabla 5.7., de Pérez et al., 1992a) y la concentración típica del aire (AIRE). 402
- Figura 5.30. Diagrama ternario de la concentración relativa de N_2 -He- CO_2 de los gases disueltos en las aguas subterráneas muestreadas de la presente tesis. También se ha representado la concentración relativa de los gases en la atmósfera de las galerías y de las manifestaciones volcánico-hidrotermales de Canarias (Tabla 5.7., de Pérez et al., 1992a), así como del agua saturada en aire (ASA), y del aire atmosférico (Aire). (Modificado de Inguaggiato et al., 2000). 403
- Figura 5.31. Diagrama ternario de la concentración relativa de CO_2 - N_2 - O_2 de los gases disueltos en las aguas subterráneas muestreadas de la presente tesis. También se ha representado la

- concentración relativa la galería N° 115 (REB), de las fumarolas del Teide (Pérez et al., 1992a), así como del agua saturada en aire (ASA), y del aire atmosférico (AIRE). (Modificado de Capasso e Inguaggiato, 1998)..... 405
- Figura 5.32. Concentraciones de CO₂ y N₂ disueltos en las aguas subterráneas muestreadas. También se ha incluido a modo de comparación el ASA (agua saturada en aire). Existe una correlación inversa entre los contenidos de estos dos gases disueltos en las aguas..... 406
- Figura 5.33. Mapa de actividad del gas Radón (²²²Rn) en las aguas subterráneas de la zona central de Tenerife. En la esquina inferior izquierda se ha representado el diagrama de probabilidad acumulada usado para agrupar por clases las diferentes concentraciones en el mapa. En el caso de las galerías, el dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. Ver explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 408
- Figura 5.34. Perfiles NNE-SSO (A-A´) y OSO-ENE (B-B´) de la zona de estudio (ver Figura 5.33. para ubicación) donde se han representado los datos de ²²²Rn disuelto en los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles y diferenciados por poblaciones geoquímicas siguiendo la misma leyenda que en la Figura 5.X.. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.8.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la galería o pozo. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas negras: trazas de galerías (horizontales), pozos y sondeos (verticales) proyectados sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más información en el texto..... 410
- Figura 5.35. Diagrama de correlación entre la actividad media de ²²²Rn disuelto en las aguas subterráneas de diversos acuíferos del mundo y el contenido medio en uranio en las rocas del medio poroso de cada acuífero. Modificado de D´Alessandro y Vita, 2003..... 411
- Figura 5.36. Mapa de los puntos de muestreo de ³He/⁴He y ⁴He/²⁰Ne en los fluidos terrestres de Tenerife incluidos en la Tabla 5.9., durante los estudios entre 1991-1997 y en la presente tesis (2006). También se representan los centros eruptivos históricos. A-A´, B-B´ y C-C´ indican la ubicación de los perfiles de la Figura 5.39. GS: gas de la atmósfera del suelo; GH: gas hidrotermal (burbujeo); F: fumarolas del Teide; GW: aguas subterráneas. Proyección UTM (m), WGS84 28N. 414
- Figura 5.37. Diagrama binario de la relación ³He/⁴He (observados) frente a ⁴He/²⁰Ne en las muestras de fluidos terrestres de Canarias de la Tabla 5.9. También se han incluido los valores de los posibles reservorios de Helio: atmosférico, cortical o radiogénico, mantélico tipo MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) y mantélico tipo OIB (Oceanic Island Basalts) así como las líneas de mezcla atmosférico-cortical y atmosférico-mantélico (tanto MORB como OIB). Triángulos: fumarolas; Rombos: gases hidrotermales; Círculos: aguas subterráneas; Cuadrados: gases de la atmósfera del suelo. Modificado de: Sano et al. (1985). 415
- Figura 5.38. Distancia del punto de muestreo al cono sumital del volcán Teide respecto al valor de la relación ³He/⁴He_{corr} en los fluidos terrestres de la Tabla 5.9.. Las líneas punteadas horizontales azul y verde representan el valor de dicha relación en el aire y en las fumarolas del Teide, respectivamente. Triángulos: fumarolas del Teide; cuadrados: gases en suelo; rombos: gases hidrotermales; círculos blancos: aguas subterráneas de la presente tesis; círculos rojos: aguas subterráneas de estudios previos. Las barras de error en cada punto corresponden con el error de la Tabla 5.9. Las tres letras en cada punto corresponden con las siglas en la Tabla 5.9. Ver más explicación en el texto. 419
- Figura 5.39. Perfiles NNE-SSO (A-A´), OSO-ENE (B-B´) y NO-SE (C-C´) de la zona de estudio (ver Figura 5.36. para ubicación) con las isolíneas de la relación ³He/⁴He_{corr} (R/Ra) de los puntos de muestreo extrapoladas en los mismos perfiles. El número de cada punto de muestreo coincide con la Tabla 5.9.. El dato siempre se ha representado en el frente o zona más profunda de la misma. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. Líneas azules: posición del nivel freático, sólo válida cualitativamente; flechas azules: hipotéticas líneas de flujo del agua subterránea; flechas negras discontinuas verticales: zonas de flujo preferencial de ³He endógeno propuestas.

Líneas negras horizontales: trazas de galerías proyectadas sobre cada perfil. Líneas blancas discontinuas: posición inferida del límite superior del zócalo impermeable y/o del núcleo de baja permeabilidad. Ver más explicación en el texto..... 420

CAPÍTULO VI

- Figura 6.1. Esquema de los diferentes términos del balance hídrico general de un acuífero en un intervalo de tiempo determinado..... 426
- Figura 6.2. Mapas de los diferentes términos del balance hídrico superficial a nivel insular estimados por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) a partir del MHS. Extraídos de su página web:www.aguasdetenerife.org. 429
- Figura 6.3. Mapa general de ocupación del suelo la zona central y septentrional de Tenerife en el que también se han señalado los límites del acuífero de Las Cañadas que corresponden con los de la Zona III (y subzonas III.0.1, III.0.2 y III.0.3), así como las isoyetas de la precipitación anual media calculadas por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) en el Plan Hidrológico Insular (PHI, 1996). Curvas de nivel cada 500 m de altitud. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. Fuente: GRAFCAN (www.grafcan.es). 431
- Figura 6.4. Mapas de la evapotranspiración real (ETR) anual media (en mm) (izquierda) y de la infiltración anual media (en mm) (derecha) del acuífero de Las Cañadas y alrededores obtenido por el CIATFE a través del MHS. El mapa de la infiltración presenta tanto los resultados del PHI de Tenerife (PHI, 1996), con líneas blancas, como los de la página web del CIATFE, representado por contornos de colores (los valores están integrados en el borde de los contornos). Modificado de la página web del CIATFE (www.aguastenerife.org)..... 432
- Figura 6.5. Mapa de sombras de la Caldera de Las Cañadas del Teide con la ubicación de todos los puntos de muestreo de la Caldera de Las Cañadas de los que se disponen de datos de la relación rCl/rBr utilizados en la sección 4.3.5. de la presente tesis, agrupados en función del origen de los cloruros disueltos en sus aguas subterráneas. Del sondeo Nº 1 (S-1) no hay datos disponibles de dicha relación. También se han representado los pluviómetros instalados en el área de Las Cañadas y las estaciones meteorológicas C406G y C451U de la AEMET (ver leyenda). El trazo negro discontinuo representa el límite superior visible de la pared de la caldera. Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 436
- Figura 6.6. Evolución temporal del caudal (en $L \cdot s^{-1}$) de agua subterránea drenado por las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA). El caudal drenado en ambas galerías ha sido muy estable en el tiempo oscilando entre 7 y 10 $L \cdot s^{-1}$, excepto en el año 1973 en que la galería Nº 11 (ESU) alcanzó los 29,3 $L \cdot s^{-1}$ 437
- Figura 6.7. Evolución temporal de la concentración de cloruros en las aguas subterráneas de los sondeos Nº 1 (S-1) y 2 (S-2), y en las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA). Datos procedentes de la BDHLC (Anexo A.4). 438
- Figura 6.8. Concentración de cloruros ($mg \cdot L^{-1}$) de las aguas de lluvia registradas entre noviembre de 2005 y febrero de 2007 en el pluviómetro P9, junto a la deposición atmosférica o D (en $g \cdot m^{-2}$) y la precipitación mensual (en mm) medida en dicho pluviómetro, así como la precipitación media interanual en el pluviómetro C406G de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), ubicado muy próximo del P9 (Figura 6.5.). 441
- Figura 6.9. Imagen de la escorrentía superficial esporádica en el interior de Las Cañadas, más concretamente en la pared sur de la Caldera (zona de Los Azulejos), como consecuencia de las intensas precipitaciones acaecidas en diciembre de 2008. Foto cedida por David Calvo..... 442
- Figura 6.10. Imagen de la laguna que se forma de manera temporal en el Llano de Ucanca, en el interior de Las Cañadas, como consecuencia de las intensas precipitaciones en forma de lluvia y nieve y de la existencia en esta zona de suelos cubiertos de materiales muy finos y compactados que disminuyen la permeabilidad del terreno. Al fondo de la imagen se puede ver el Teide nevado y

- a la derecha el espolón de Los Roques de García, indicados en la Figura 6.5.. Foto: Félix Capote (www.felixcapote.es)..... 442
- Figura 6.11. Serie temporal de la precipitación mensual (en décimas de mm) registrado desde 1985 hasta marzo de 2009 en la estación C406G. Se observa claramente que las precipitaciones de diciembre de 2002 (dic-02) son mucho más cuantiosas que el resto, excepto las de diciembre de 1991 (dic-91), mientras que las de diciembre de 2008 (dic-08) son algo menos del doble del valor medio para el mes de diciembre en todo el periodo histórico (línea azul). 444

CAPÍTULO VII

- Figura 7.1. Caudal total extraído por los pozos y galerías que penetran total o parcialmente en la Zona III que corresponde con el acuífero de Las Cañadas. Izquierda: por regiones; derecha: por puntos de muestreo..... 451
- Figura 7.2. Mapa de la zona central de Tenerife donde se ha integrado gran parte de información georeferenciada a lo largo de la tesis para el modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas. Isolíneas de contorno: valores de la relación molar rCl/rBr en las aguas subterráneas. Los puntos de muestreo (círculos) tienen diferentes colores en función del origen o proceso de la relación rCl/rBr . Líneas malva y azul: trazados de los cortes de las Figura 7.3. y 7.4. Flechas rojas: principales líneas de flujo inferidas. Los números 3 y 6 corresponden con los apartados del texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. 456
- Figura 7.3. Corte transversal de Tenerife (indicado en el mapa de la isla insertado y en la Figura 7.2.) con el modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas. La permeabilidad (K) relativa de los diferentes materiales se ha indicado también en el corte: $K_1 > K_2 > K_3$. Los materiales de la Serie Moderna (fonolitas y basaltos) que forman el medio poroso del acuífero de Las Cañadas procedentes del CTPV (K_1) son más jóvenes y permeables que los materiales de Pre-Cañadas (K_2) que constituyen la pared de la Caldera y la vertiente sur de la isla y, posiblemente también, la base de la Caldera. Ambas series tienen una permeabilidad mucho mayor que el núcleo de alteración hidrotermal (K_3). Los números y las letras describen los procesos que tienen lugar en el acuífero y en las zonas adyacentes. Ver más explicación en el texto. 457
- Figura 7.4. Corte hidrogeológico de la Caldera de Las Cañadas en el que se ha representado los 6 sondeos de investigación junto a la intersección con las galerías procedentes de la periferia de Las Cañadas (círculos y diagramas de Stiff modificados) e información de los estudios geofísicos de Aubert y Kieffer (1998) y de Pous et al. (2002). RDG: Roques de García; MB: Montaña Blanca. Ubicación del corte: línea malva en la Figura 7.2.. 459

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Permeabilidad de los materiales volcánicos de la isla de Tenerife (Custodio, 1985).	31
Tabla 1.2. Resumen de las características del sondeo profundo de exploración geotérmica realizado por el IGME en la zona de la Dorsal Noroeste (ver ubicación en la Figura 1.30). Fuente: IGME (1993).	42

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Resumen de las principales características de los 6 sondeos de investigación realizados en el interior de Las Cañadas. Prof.: profundidad. Fuentes: MOPU-UNESCO (1970-1975) y Farrujia et al. (2001a).....	56
Tabla 2.2. Resumen de las galerías (G) y del sondeo de investigación (S.I.) C-2, representados en el corte de la Figura 2.7.. Coordenadas X (longitud) e Y (latitud) están referenciadas a la entrada o boca de la galería. También se incluyen los datos de Z (altitud), en m.s.n.m., de la entrada o boca (BC) y del frente (FR) o zona más profunda de cada galería o sondeo. En el caso de las galerías, el Z FR representado fue calculado teniendo en cuenta la longitud (Long.) de cada una (contando solo la galería principal, sin ramales) y que todas ellas suelen estar excavadas con una pendiente positiva de alrededor de 5:1000 (Coello, 1973).	62
Tabla 2.3. Cota inferida del límite superior (LSCC) e inferior (LICC) así como del nivel freático (N.F. CIATFE) y del zócalo impermeable (ZOCALO CIATFE), en m.s.n.m., en cada punto de medida de los diferentes perfiles de AMT según el modelo en 2-D de Pous et al. (2002) y según el modelo Fly-Subterráneo del CIATFE, respectivamente. Ver más explicación en el texto.	68
Tabla 2.4. Resumen de las características de las galerías (G) y pozos (P), representados en la Figura 2.13.. Las características del sondeo de investigación S-1 ya fueron descritas en la Tabla 2.1. Las coordenadas X e Y son longitud y latitud (en metros) respectivamente y están referenciadas a la entrada o boca de la galería. También se incluyen los datos de Z (altitud), en m.s.n.m., de la boca o entrada (BC) y del frente (FR) o zona más profunda de cada galería o sondeo. En el caso de las galerías, el Z FR representado fue calculado teniendo en cuenta la longitud (Long.) de cada una (contando solo la galería principal, sin ramales) y que todas ellas suelen estar excavadas con una pendiente positiva de alrededor de 5:1000 (Coello, 1973).	74

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Datos principales de los pluviómetros instalados en la presente tesis (serie P) y de los pluviómetros de la AEMET (serie C) ubicados en las proximidades de cada pluviómetro y que han sido utilizados para comparar los resultados de precipitación media mensual (P media). Los pluviómetros en azul son aquellos ubicados dentro de los límites o en las proximidades del acuífero de Las Cañadas (ver Figura 3.1.).	92
Tabla 3.2. Resumen estadístico de la conductividad eléctrica (C.E., en $\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH (ambos medidos a 25°C), así como de las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios y de la relación Na/Cl en todas las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis cuyo IBE está entre -20 y +20% ($r=\text{meq}/\text{L}$). Mar: composición química promedio del mar según Goldbert (1961). Los valores de la relación Na/Cl se obtuvo de la serie de datos completa de la Tabla A.3.1.	99
Tabla 3.3. Concentración promedio ponderada, en función de la precipitación, de la composición química del agua de lluvia analizada en cada pluviómetro (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Mar: composición química promedio del mar según Goldbert (1961). N ^o : número del pluviómetro. n.d.: no determinado.....	102
Tabla 3.4. Deposición atmosférica total (ΣD , en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) y aportación o tasa anual de deposición (A, en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de cada ión en los 22 pluviómetros. También se ha incluido la cota, distancia al mar y la cumbre, vertiente (V), precipitación total (ΣP_i) y número de días totales de observación ($\Sigma \Delta t_i$) en cada pluviómetro.	110

Tabla 3.5. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (A_{cl}) y gradientes altitudinal (ΔA_{cl}) y longitudinal de la misma (ΔA_{cl}^*) obtenidas en el Archipiélago Canario. N ^o : número de estaciones meteorológicas o pluviómetros. TF: Tenerife; FTV: Fuerteventura; GC: Gran Canaria.	113
Tabla 3.6. Composición isotópica del agua de lluvia de Tenerife perteneciente a los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2005. El número (N ^o) del pluviómetro coincide con el de la Tabla 3.1.; V: vertiente norte (N) y sur (S); P: precipitación (en mm o L·m ⁻²); Z: cota del pluviómetro (en m.s.n.m.); δD y $\delta^{18}O$ se expresa como ‰ vs V-SMOW; d: exceso de deuterio según la ecuación $d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$ (Dansgaard, 1964). Valores en negrita: descartados por posible evaporación en la caída (ver más explicación en el texto).	114
Tabla 3.7. Composición isotópica de las precipitaciones de Tenerife publicadas en diferentes trabajos. V: vertiente, C: cumbre, S: sur, SE: sureste; N: norte, NE: noreste; Tipo: L: lluvia, N: nieve; δD y $\delta^{18}O$ se expresa como ‰ vs V-SMOW; d: exceso de deuterio. Valores en negrita: descartados por posible evaporación en la caída. Fuentes: A: Gonfiantini, 1973 (SPA-15); B: Custodio et al., 1987; C: Albert-Beltran et al., 1990.	116
Tabla 3.8. Promedio ponderado de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}O$ (‰ vs V-SMOW) del agua de lluvia en cada pluviómetro. Del P9 al P1 pertenecen a la vertiente sur y del P5 al P21 a la norte.	121
Tabla 3.9. Precipitación media mensual registrada en las vertientes norte y sur de Tenerife en la presente tesis durante los meses de octubre y noviembre de 2005, en comparación con la precipitación media mensual calculada a partir de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (ver Tabla 3.1.).	135
Tabla 3.10. Líneas meteóricas locales (LML) obtenidas en las islas del Archipiélago Canario por diferentes autores, en comparación con la línea meteórica mundial (LMM). N ^o : número de puntos de muestreo con los que se obtuvo la LML; Tipo: As: aguas subterráneas de recarga, P: precipitación, M: manantiales. Valores en ‰ V-SMOW.	126
Tabla 3.11. Gradientes altitudinales del $\delta^{18}O$ y δD obtenidos en el Archipiélago Canario y en otras islas volcánicas y no volcánicas alrededor del mundo. N ^o : número de puntos de muestreo. Tipo: As: aguas subterráneas de recarga; L: lluvia; M: manantiales; N: nieve; R: arroyos o riachuelos. V (Vertiente): N: norte; S: sur; C: cumbre. Ver más explicación en el texto.	126

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Resumen de todos los datos incluidos en la nueva base de datos hidroquímica para el acuífero de Las Cañadas (BDHLC), en la que los "datos históricos" corresponden a todas las fuentes excepto a los datos del presente estudio.	142
Tabla 4.2. Características principales de los 74 puntos seleccionados del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes para el presente estudio. Código: el de cada punto según el CIATFE (PHI, 1996). Coordenadas X (longitud) e Y (latitud) de la entrada o boca (BC) y del frente o zona más profunda (FR) de cada galería (G). Las coordenadas del FR fueron obtenidas con un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS en inglés). En el caso de los pozos (P) y sondeos de investigación (S.I.), las coordenadas de la BC y del FR coinciden. Z (altitud), en m.s.n.m., de la entrada (BC) de cada galería, pozo o sondeo. Q: caudal más reciente según los datos disponibles de la BDH del CIATFE. Long./Prof.: longitud o profundidad de la obra de captación (en metros). Región: descripción de la región en la que se encuentra ubicado el punto de muestreo (ver Figura 4.5.). Zona: ubicación de cada punto de muestreo según la zonificación hidrogeológica del CIATFE (PHI, 1996). Fecha (en dd/mm/aaaa) del análisis seleccionado. Fuente: BDHLC.	146
Tabla 4.3. Resumen de la información referente a los 74 puntos seleccionados en la nueva Base de Datos Hidroquímica de Las Cañadas (BDHLC) elaborada para la presente tesis.	148
Tabla 4.4. Resumen estadístico de todos los valores disponibles de los principales parámetros, medidos tanto en el campo como en el laboratorio (lab), respecto a la media en los 6 puntos de muestreo seleccionados. \bar{x} media desviación típica coeficiente de dispersión ($\sigma^{100/x}$) (en %). Los valores en negrita de D señalan que son ≤ 10 %. La \bar{x} y σ de la conductividad eléctrica (C.E.) se	

representa en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; \bar{x} y σ de la Temperatura del agua (temp. agua) en grados centígrados	151
Tabla 4.5. Principales parámetros de los análisis físico-químicos seleccionados como representativos de los 74 puntos del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. C.E.: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Tª: temperatura del agua (en °C). Todas las concentraciones se expresan en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. IBE: Error de Balance Iónico (en %). LD: límite de detección; n.d.: no determinado; n.m.: no medido.	153
Tabla 4.6. Resultado del test de significancia en el que se obtiene los coeficientes de correlación de Pearson (r) y la probabilidad ($1-p$) entre los principales parámetros analizados en la presente tesis en los 74 puntos seleccionados. C.E.: conductividad eléctrica. Tª: temperatura del agua. Alk: Alcalinidad Total (HCO_3+CO_3); TDIC: Carbono Inorgánico Disuelto Total; TDS: Total de Sólidos Disueltos; P _{CO2} : presión parcial de CO ₂ (en atm) calculada con el PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999). Los valores marcados en amarillo indican aquellas correlaciones que cumplen el test de significancia con una probabilidad del 99,99 %, es decir, con un valor de $1-p$ igual o superior a 0,9999. Verde: comunes; naranja: grupo catiónico; azul: grupo aniónico. Ver más explicación en el texto.	166
Tabla 4.7. Resultados de los análisis físico-químicos en las 38 muestras seleccionadas para el estudio del segundo Análisis Clúster (CA). Todas las concentraciones en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, si no se indica lo contrario. pH y C.E. medidos en laboratorio. C.E.: conductividad eléctrica (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); Tª: temperatura del agua (en °C); Alk: Alcalinidad Total; TDS: Total de Sólidos Disueltos (en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); P _{CO2} : presión parcial de CO ₂ (en atm.). n.d.: no medido. Ver más explicación en el texto.	171
Tabla 4.8. Continuación de la Tabla 4.7. Todas las concentraciones en $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. LD: límite de detección. Valores en rojo: concentraciones por debajo del LD.	173
Tabla 4.9. Valores ponderados en función del caudal (Q) de las variables o elementos de la Tabla 4.7 y 4.8., expresadas en las mismas unidades que en dicha tabla, para los grupos A y B de casos diferenciados mediante el CA. El valor de ΣQ corresponde a la suma de los caudales (en $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$).	175
Tabla 4.10. Composición química en % de óxidos de las dos muestras de rocas del CTPV. La muestra de "fonolita" de Araña et al. (1989) y de "basalto" de Alonso y Quesada (1989).	228
Tabla 4.11. Composición química (en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) resultante de la disolución isoquímica de 1 gramo de cada muestra de roca del CTPV. La muestra de "fonolita" de Araña et al. (1989) y de "basalto" de Alonso y Quesada (1989).	229
Tabla 4.12. Datos de la concentración de nitratos (NO ₃), cloruros (Cl) y bromuros (Br) (todos en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y de la relación molar de rCl/rBr (R) en las aguas subterráneas analizadas en los laboratorios del ITER y del IGME en la presente tesis y del Proyecto CoCo (Proyecto CCA-8510/001, 1985). Loc.(localización): L: litoral, M: medianía, C: cumbre; Tipo: G: galería, P: pozo, S: sondeo, M: manantial; X: longitud UTM (m), Y: latitud UTM (m), Z: altitud (m.s.n.m.); Q (caudal en $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$); RP: coordenadas del punto de representación; Fecha: fecha del muestreo (dd/mm/aa); Fuente: (1) Proyecto CCA-8510/001 (1985), (2) Presente estudio: A: laboratorio ITER, B: laboratorio IGME. Efectos: A: agrícola; E: aridez climática, G: gas/volcanismo reciente, M: mezcla, R: recarga, D: desconocido, EVA: evaporación.	255
Tabla 4.13. Datos de los cálculos geotermométricos de las diferentes fases de la sílice disuelta (SiO ₂) y de las relaciones iónicas K/Na (Tkn) y K/Mg (Tkm) en las aguas subterráneas analizadas en la presente tesis. Los Índices de Solubilidad (IS) fueron calculados con el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999). Tª: temperatura. En negrita se indican aquellos índices de solubilidad anormales que se comentan en el texto.	259
Tabla 4.14. Valores de los diferentes parámetros utilizados para la representación de las aguas subterráneas en los diagramas de Giggenbach (1988) que corresponden con las Figuras 4.74., 4.75., 4.76. y 4.X. fCO ₂ se expresa en bares; t _{kn} y t _{km} se expresa en °C.	284

Tabla 4.15. Características físico-químicas del condensado de las fumarolas del cono de cumbre del Teide. Concentraciones en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Conductividad Eléctrica (C.E.) en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; Temperatura (T^a) en $^{\circ}\text{C}$; Error de Balance Iónico (IBE); Índice de Saturación (IS) de la calcita calculado con el PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) en la presente tesis. Fuente: Albert-Beltrán et al. (1989).	290
Tabla 4.16. Datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$, δD y exceso de deuterio (d) (en ‰ vs V-SMOW) y de la concentración de cloruros (Cl) (en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) y la conductividad eléctrica (C.E.) (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes, agrupadas por regiones. También se ha representado la altura del punto de muestreo y de la superficie en la vertical de dicho punto (ambas en m.s.n.m.), así como la altura del área de recarga o infiltración (h , en m.s.n.m.) deducida a partir de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, aplicando el gradiente altitudinal estimado por Custodio et al. (1987): $\delta^{18}\text{O} = -0,00243\cdot h - 2,20$. Los valores en negrita indican las 7 muestras donde la altitud del área de infiltración es más baja que la altura de la superficie en la vertical. Ver más explicación en el texto.	300
Tabla 4.17. Valores de caudal (Q), de la concentración del carbono inorgánico disuelto total (TDIC) y de la relación isotópica $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ (en ‰ vs VPDB) en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes. T: Tipo: G: galería; P: pozo; S.I.: sondeo de investigación. También se ha incluido la composición isotópica del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ original calculada (en ‰ vs VPDB) de la interacción agua-gas (ver más explicación en el texto). Coordenadas UTM de latitud (X) y longitud (Y) (en metros) y altitud (Z) (en m.s.n.m.) de cada punto de muestreo. En el caso de las galerías, las coordenadas corresponden al frente principal. Ver Figura 4.94. para la ubicación de cada punto. Ref.: referencia: A: muestreadas en el presente trabajo; B: Custodio et al. (1987); C: Soler et al. (2004).	323
Tabla 4.18. Composición química de las aguas subterráneas de las 37 galerías y de los 2 sondeos de investigación(*) seleccionados del acuífero de Las Cañadas. T^a : temperatura, en $^{\circ}\text{C}$; C.E.: conductividad eléctrica, en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; Si: sílice disuelta, en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ SiO_2 ; Alk: alcalinidad, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de HCO_3 ; Ca, Mg, Na, K, SO_4 , Cl, NO_3 , y F en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$; IBE: Error de Balance Iónico, en %. Datos procedentes de la BDHLC, principalmente del CIATFE y de Chiodini (1994).	336
Tabla 4.19. Galerías con dos análisis de muestras de agua a diferente profundidad horizontal a lo largo del canal interior, usadas para calcular el factor de desgasificación de CO_2 (F). También se ha representado el TDIC y la descarga controlada de CO_2 ($\Phi\text{CO}_2\text{C}$) en las dos muestras de agua de cada galería, así como el caudal ($\Phi\text{H}_2\text{O}$), la distancia entre muestras (L), la diferencia de concentración de TDIC (ΔCO_2) y de Ca+Mg ($\Delta(\text{Ca}+\text{Mg})$) entre las dos muestras, y el porcentaje de diferencia entre la concentración de ($\Delta(\text{Ca}+\text{Mg})$) y de (ΔCO_2) existente entre las dos muestras debida posiblemente a la precipitación de una fase sólida. Ver más explicación en el texto.	343
Tabla 4.20. Resultados de las 5 muestras de agua tomadas a diferente profundidad horizontal a lo largo del canal interior de la galería N° 28 (SFN), en las que se ha representado la distancia de la entrada o bocamina y la longitud del tramo considerado entre los pares de muestras (L). Ver más explicación en el texto.	346
Tabla 4.21. Resultados de las aguas subterráneas de los 39 puntos de muestreo seleccionados del acuífero de Las Cañadas. L: distancia entre entrada o bocamina y el frente (o el alumbramiento principal de donde surge el agua); TDIC _i : concentración del carbono inorgánico disuelto en la bocamina de cada galería; $\Phi\text{CO}_2\text{C}_i$: descarga controlada de CO_2 en la bocamina de cada galería; $^{\#}\text{TDIC}_i$: concentración del carbono inorgánico disuelto en el frente de cada galería calculado con la ecuación 4.56.; $^{\#}\Phi\text{CO}_2\text{C}_i$: descarga controlada de CO_2 en el frente de cada galería calculado a partir de las ecuación 4.55.	348
Tabla 4.22. Emisión total y específica de CO_2 del acuífero volcánico de Las Cañadas y de otros acuíferos del mundo. Referencias: ^(A) Gambardella et al. (2004); ^(B) Evans et al. (2002); ^(C) Pecorianano et al. (2005).	351

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1. Abundancia de los diferentes isótopos estables naturales del Helio.....	362
Tabla 5.2. Valores representativos de la relación isotópica $3\text{He}/4\text{He}$ y $4\text{He}/20\text{Ne}$ en fluidos terrestres de diferentes ambientes geodinámicos.	362
Tabla 5.3. Valores de la relación $3\text{He}/4\text{He}$ (R/Ra) en las rocas y fluidos terrestres de Canarias, según Graham (2002). Fuentes: (0)Vance et al., 1989; (1)Graham et al., 1996; (2)Hilton et al., 2000; (3)Pérez et al., 1992a; (4)Pérez et al., 1996; #Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, sin publicar. *Dato del "Pozo Los Llaneros" en el año 2005.....	368
Tabla 5.4. Puntos de muestreo seleccionados en el presente estudio para el análisis de gases disueltos en las aguas subterráneas. Código: código del PHI (1996). Tipo: G: galería; P: pozo. Coordenadas de la bocamina (BC) y del frente (FR) en UTM (m), WGS 84, 28N. Z: altitud de la bocamina (en m.s.n.m.). Long./Prof.: longitud de la galería (contando sólo la galería principal, sin ramales) o profundidad del pozo (en metros). Q: caudal en L·s-1. Fecha: fecha del muestreo (en dd/mm/aaaa).	370
Tabla 5.5. Concentraciones de los gases disueltos en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes obtenidos a partir de las relaciones 5.11 y 5.13. Siglas: las tres letras coinciden con las de la Tabla 5.4. Tª: temperatura del agua (en °C). Las concentraciones se expresaron como mL (cm ³) de gas disuelto por L de agua en condiciones estándar (25°C, 1 atm.), y como la presión parcial p (en atm.). ASA: concentraciones teóricas de los gases disueltos en agua ultrapura saturada en aire atmosférico en condiciones estándar. n.d.: no determinado; n.m.: no medido.	381
Tabla 5.6. Concentraciones relativas de los gases disueltos en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes muestreadas en la presente tesis. También se han incluido las concentraciones de los gases medidas en la atmósfera de diferentes galerías de Tenerife y publicadas por el IGME (IGME, 1983-1993e)(1) y por Valentin et al. (1989) (2), y la composición típica del aire y del agua saturada en aire (ASA) publicada en Capasso e Inguaggiato (1998). N ₂ , O ₂ y CO ₂ en % de volumen; Ar, He, H ₂ , CO y CH ₄ en ppmV. n.m.: no medido; n.d.: no detectado.....	383
Tabla 5.7. Concentraciones relativas de los gases en diferentes manifestaciones volcánico-hidrotermales de Canarias publicadas por Pérez et al. (1992a). N ₂ , O ₂ y CO ₂ en % Vol; Ar, He, H ₂ , CO y CH ₄ en ppmV. n.m.: no medido; n.d.: no detectado.....	400
Tabla 5.8. Resumen de los niveles detectados de actividad del gas radón (²²² Rn) disuelto en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes.	407
Tabla 5.9. Datos de $3\text{He}/4\text{He}$ observados (obs) y corregidos (corr), ambos con el error analítico, y de $4\text{He}/20\text{Ne}$ en las muestras de fluidos terrestres de Canarias: en las aguas subterráneas (GW), gases hidrotermales (GH), gas en suelo (GS) y gases fumarólicos (F). También se incluye las coordenadas X (longitud) e Y (latitud) en UTM (m), altitud, distancia al cono sumital del Teide, temperatura y fecha de cada muestra. En el caso de las galerías, las coordenadas indican el frente o zona más profunda del ramal principal (si existe más de uno). Las muestras tomadas fuera de la isla de Tenerife están señaladas como (LP): La Palma y (LZ): Lanzarote. Fuentes: (1) Pérez et al., 1992; (2) Pérez et al., 1994; (3) Pérez et al., 1996; (4) Hernández, 1997; (5) Presente estudio. Ver más explicación en el texto.	413

Tabla 5.10. Contribución de cada reservorio a la composición isotópica de $3\text{He}/4\text{He}$ y $4\text{He}/20\text{Ne}$ en los fluidos terrestres de Canarias. Los números y las siglas corresponden con los de la Tabla 5.9. 417

Tabla 5.11. Resumen de las zonas donde se encuentran las concentraciones anómalas en los gases disueltos no radiactivos disueltos en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y alrededores. 422

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1. Balance hídrico superficial de Tenerife elaborado por el CIATFE (Braojos, 2007). %: tanto por ciento respecto a la precipitación. Datos medios multianuales obtenidos para el periodo 1944/45 y 2003/04. 429

Tabla 6.2. Balance hídrico subterráneo medio de Tenerife elaborado por el CIATFE. Datos medios obtenidos para el periodo 1944/45 y 2003/04. Extraído de su página web:www.aguastenerife.org 430

Tabla 6.3. Resultados del balance hídrico superficial medio para la Zona III, desglosado por subzonas, obtenido por el CIATFE a partir del MHS, con datos del periodo 1944/45-2003/04. (Comunicación interna, CIATFE). 432

Tabla 6.4. Cálculo de la recarga local a partir de la concentración de cloruros en las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA) ($4,8$ y $5,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente) y de la deposición atmosférica (D) en el pluviómetro P9. P: precipitación; CP: concentración de cloruros en el agua de lluvia; DP: deposición atmosférica; R_{ESU} : recarga a partir de los datos de la galería Nº 11 (ESU); R_{FFA} : recarga a partir de los datos de la galería Nº 12 (FFA); IES: escorrentía superficial entrante; C_{IES} : concentración de cloruros en la escorrentía, asumiendo que es igual a la de las lluvias en el mismo mes; A_{IES} : aporte de cloruros por la escorrentía. 447

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1. Características hidroquímicas principales de las aguas subterráneas a lo largo de una línea de flujo teórica en la zona sur de Tenerife. 468

Resumen

En Tenerife, al igual que en el resto de las islas del Archipiélago Canario, los recursos hídricos superficiales son prácticamente inexistentes, siendo las aguas subterráneas las que aportan más del 90 % de los recursos hídricos que se consumen. En este contexto, el acuífero de Las Cañadas del Teide es, según el Plan Hidrológico Insular de Tenerife de 1996, la principal reserva de aguas subterráneas de la isla. Además, el acuífero de Las Cañadas posee una estrecha interacción con el sistema volcánico-hidrotermal del volcán Teide, que lo convierte en un potencial "trazador" de la actividad sismo-volcánica de la zona

El objetivo general de esta tesis es la elaboración de un Modelo Hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas que permita entender la evolución y comportamiento del acuífero, los procesos y condiciones que determinan las características físico-químicas e isotópicas finales de las aguas subterráneas y su interacción con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide. Para la elaboración del Modelo Hidrogeoquímico ha sido necesario aplicar diversas metodologías geoquímicas, en las que cada una de las cuales no puede explicar por sí sola el funcionamiento físico y químico del sistema y producir un modelo conceptual, por lo que ha sido necesario la integración de todos los resultados para una mejor interpretación.

Se ha elaborado un modelo físico del acuífero de Las Cañadas que también ha permitido realizar una primera aproximación de la geometría de la zona saturada, aportando nueva información al debate sobre el origen de la Caldera de Las Cañadas. Esta geometría se ha obtenido considerando los diferentes estudios geofísicos y geológicos realizados en años recientes en Las Cañadas, y la información litológica de las galerías, pozos y sondeos de la zona.

Se ha realizado un estudio de las características químicas e isotópicas de la recarga a través del muestreo y análisis del agua de lluvia durante 18 meses a lo largo de un perfil N-S de Tenerife, que atraviesa el acuífero de Las Cañadas desde el nivel del mar hasta la Caldera de Las Cañadas, siendo los datos más completos, hasta la fecha, por su representatividad espacial y temporal.

Debido a la complejidad del acuífero de Las Cañadas y de la cuantiosa información disponible desde el punto de vista hidroquímico, en la presente tesis se optó por no estudiar las variaciones temporales de las características hidrogeoquímicas del mismo, centrándose casi exclusivamente en describir la situación actual y usando principalmente los datos recopilados durante el desarrollo de la tesis en dos campañas de campo realizadas en los años 2004 y 2006. También se ha creado una Base de Datos Hidroquímica de Las Cañadas (BDHLC) que por primera vez integra y unifica gran parte de la información disponible, no sólo de las características físico-químicas e isotópicas de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas sino de todo Tenerife.

El estudio de los procesos de interacción agua-roca-gases en el acuífero ha sido el centro de atención en gran parte de la presente tesis a través de estudios geotermométricos, diagramas de estabilidad mineral y de equilibrio químico y un modelado hidrogeoquímico. Los

estudios de isótopos estables de oxígeno, hidrógeno y carbono han permitido determinar la principal área de recarga, así como el origen de las aguas subterráneas y del dióxido de carbono (CO_2) disuelto en las mismas. Por último, también se ha cuantificado la aportación endógena y atmosférica de CO_2 y de cloruros (Cl) a las aguas subterráneas, y se ha realizado un balance de masa de los mismos para el acuífero.

En este trabajo también se ha llevado a cabo un estudio sobre el origen, características y distribución espacial de los gases disueltos en las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas. Dicho estudio ha permitido comprobar que el control espacial de los mismos puede resultar una herramienta muy útil para la comprensión de la circulación del agua subterránea en dicho acuífero y para identificar las zonas de mayor conexión con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide.

Considerando los principales resultados de la geoquímica de las aguas subterráneas y de los gases disueltos en la presente tesis, el modelo propuesto del funcionamiento del sistema es que las aguas subterráneas de la zona de Las Cañadas están recibiendo un aporte directo de CO_2 que disminuye el pH y favorece los procesos de interacción agua-roca, aumentando considerablemente su contenido salino, especialmente de Na y HCO_3 ; las aguas antes de llegar a la zona de descarga del Valle de salida de Icod-La Guancha donde son captadas por las galerías y pozos, se alejan de las zonas con aporte de CO_2 , por lo que rápidamente aumentan su pH debido a procesos de degasificación y/o consumo de CO_2 en las reacciones de interacción agua-roca.

A través de un balance de masas de cloruros en el acuífero se ha podido estimar en la Caldera de Las Cañadas un coeficiente de recarga medio de 0,75 (con una incertidumbre notable, aún no estimada), muy similar al valor de 0,69 obtenido por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife en la misma región.

Por último, esta tesis, además de presentar un modelo del funcionamiento del acuífero desde el punto de vista geoquímico, también provee de nuevos y cuantiosos datos para futuros estudios, relacionados directa e indirectamente con la hidrogeología (geotermia, vigilancia volcánica, etc.).

Abstract

Surficial water resources are absent in Tenerife Island as they are in the other islands of the Canary Islands. For that reason, groundwaters represent more than 90% of the resources for water consumption. Within this picture, the Hydrologic Plan for Tenerife Island of 1996 considers the aquifer within Las Cañadas del Teide caldera as the main reserve of groundwater for the island. In addition, Las Cañadas aquifer has a close interaction with the volcanic-hydrothermal system of Teide volcano, making possible to use its chemical properties as potential "tracers" of the seismic-volcanic activity of the region.

The general objective of this dissertation is to elaborate a Hydrogeochemical Model of Las Cañadas aquifer that explains the evolution and behavior of the aquifer, its processes and the conditions that determine the final physical-chemical and isotopic characteristics of the groundwater, and its interaction with the volcanic-hydrothermal system of Teide volcano. For the elaboration of this model, it was necessary to apply diverse geochemical methodologies. Each one of these methodologies cannot explain by themselves how the physical and chemical work the system to produce a conceptual model. For that reason, an integration of all the studies and results was done in order to get a better interpretation.

The construction of the physical model of Las Cañadas aquifer has allowed the identification of the geometry of the saturated zone, which gives an important contribution to the debate about the origin of the Las Cañadas Caldera. This geometry was obtained throughout the study of the different geophysical and geologic studies at Las Cañadas Caldera that have been carried out in recent years, and the lithologic information of galleries, wells, and boreholes in the region.

The chemical and isotopic characteristics of the water recharge have been studied throughout the sampling and analysis of rainfall during 18 months and along a profile N-S of Tenerife Island. This profile intercepts Las Cañadas from sea level to the North, crosses Las Cañadas Caldera, and then to the southern shore. This data is the most complete to date, due to its spatial and temporal coverage.

Due to the complexity of Las Cañadas aquifer and the amount of information available from the hydrochemical point of view, in this dissertation, the transient variations of the hydrochemical properties of the aquifer are not studied. Instead, this dissertation is centered almost exclusively in describing the present day situation or snapshot of the aquifer. To achieve that, we are using mainly the data collected during the development of this dissertation in two field seasons during 2004 and 2006. A Hydrochemical Data Base for Las Cañadas Aquifer has been created unifying a large proportion of the available information, not only about the physical-chemical and isotopic characteristics of the groundwaters of Las Cañadas but also of the entire Tenerife Island.

A large proportion of this dissertation is centered in studying the water-rock-gas interaction processes using geothermometric studies, mineral stability diagrams, chemical equilibrium, and hydrogeochemical modeling. The stable isotopes of oxygen, hydrogen, and

carbon have allowed the identification of the recharge areas as well as the origin of the groundwaters and the dissolved carbon dioxide (CO₂). Finally, the endogenic and atmospheric contributions of CO₂ and chloride (Cl) to groundwater have been quantified, and mass balance of these components for the aquifer have been made.

The origin, characteristics, and spatial distribution of dissolved gases in the groundwaters of Las Cañadas aquifer have been assessed in this work. This study has shown that the spatial distribution of these gases can be an important tool for the understanding of the circulation of groundwater in this aquifer and for the identification of zones of greater connection with the volcanic-hydrothermal system of Teide volcano.

Taking into account the results of the groundwater geochemistry and the dissolved gases, the proposed model for Las Cañadas aquifer is as follows: 1) the groundwaters within the zone of Las Cañadas is getting a direct input of CO₂ that decreases the pH and favors the water-rock interactions, increasing its salinity, especially the concentration of Na and HCO₃; 2) the waters leave the high CO₂ recharge zone before they reach the discharge zone at the output valley of Icod-La Guancha (where the water is tapped by several galleries), increasing the pH fast due to degasification processes and the consumption of CO₂ in water-rock reactions.

Using the chloride mass balance for the aquifer, it has been possible to determine a mean recharge coefficient equal to 0.75 (with a non-determined large uncertainty), similar to the 0.69 value obtained by the Insular Water Council of Tenerife for the same region.

Finally, in addition to present a model for the functioning of the aquifer from the geochemical point of view, this dissertation provides new and many data for future studies that are related directly or indirectly with hydrogeology (geothermics, volcanic monitoring, etc.).

1.1. INTRODUCCIÓN

En las Islas Canarias, el desarrollo socio-económico de las últimas décadas ha venido de la mano de un fuerte incremento poblacional y turístico, con el consiguiente aumento de la demanda de recursos hídricos. Debido principalmente a este fenómeno, las reservas hídricas subterráneas se han ido agotando progresivamente con el tiempo, con el consiguiente empeoramiento general de la calidad de sus aguas (Ministerio de Medio Ambiente, 2000). Este problema, que se ha generalizado en prácticamente todas las zonas costeras del territorio español, es especialmente acuciante en las Islas Canarias, debido a las limitaciones impuestas por los escasos recursos hídricos superficiales existentes y a las características volcánicas del medio poroso de sus acuíferos (Custodio et al., 1991). Mientras en las islas orientales del Archipiélago Canario (Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote) la escasez de recursos hídricos subterráneos se ha ido supliendo con la implantación y desarrollo de presas y plantas desalinizadoras, en las islas occidentales (Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro) los recursos hídricos subterráneos representan más del 90% del agua que se consume y, por tanto, son fundamentales desde el punto de vista económico, energético y medioambiental (Plan Hidrológico del Archipiélago Canario, 1988).

El acuífero de Las Cañadas del Teide en Tenerife, es la principal reserva hídrica de la isla y, por tanto, su importancia socio-económica relacionada con el futuro abastecimiento de agua de Tenerife es innegable (Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHI), 1996). Por otro lado, el acuífero de Las Cañadas posee una estrecha interacción con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide, que deriva del hecho de atrapar parte de los principales componentes solubles de los fluidos liberados (Albert-Beltran et al., 1989, 1990; Valentin et al., 1989, 1990; Pérez et al., 1992a, 1992b, 1996, 1999; Soler et al., 2004; Marrero et al., 2008), al igual que otros acuíferos que se desarrollan en zonas volcánicamente activas del mundo (i.e. Federico et al., 2002). La clara conexión del acuífero de Las Cañadas con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide lo convierte además en un potencial "trazador" de la actividad sismo-volcánica de la zona (Marrero et al., en prensa), aumentando el interés por la identificación y control de los potenciales parámetros físico-químicos e isotópicos del acuífero que pueden funcionar como precursores de periodos de mayor actividad (i.e. Igarashi et al., 1995; Martin-Del Pozzo et al., 2002; Federico et al., 2004; Giammanco et al., 2007; Rouwet et al., 2009).

Teniendo en cuenta que la gestión de los recursos hídricos será siempre más efectiva a medida que se disponga de una mayor información y conocimiento sobre los mismos, el desarrollo de estudios hidrogeológicos que ayuden a entender mejor su funcionamiento es una labor fundamental que permitirá optimizar dicha gestión y realizar una explotación más racional. Por todo ello, la creación y desarrollo de un modelo hidrogeoquímico que explique y proporcione información sobre las características y el funcionamiento del acuífero de Las Cañadas del Teide es de vital importancia.

La presente investigación ha sido posible gracias al apoyo financiero, logístico y/o académico del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), la Universidad de Ohio, en EE.UU., la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de La Laguna.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

Para entender la evolución y comportamiento del acuífero de las Cañadas del Teide, los procesos y condiciones que determinan las características físico-químicas e isotópicas finales de las aguas subterráneas y su interacción con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide, el objetivo final de la presente tesis es elaborar un Modelo Hidrogeoquímico del acuífero que proporcione un mayor conocimiento del mismo y contribuya a una mejor gestión de los recursos existentes en Tenerife.

Con el fin de cumplir el objetivo general de la presente tesis y teniendo en cuenta los conocimientos hidrogeológicos ya existentes del acuífero de Las Cañadas del Teide, se determinan previamente una serie de objetivos específicos que se detallan a continuación:

- Elaborar un modelo físico del acuífero de Las Cañadas que permita determinar la geometría de la zona saturada.
- Realizar una estimación preliminar de la recarga del acuífero de Las Cañadas del Teide.
- Estudiar la composición química e isotópica de la recarga a partir del agua de lluvia en el acuífero de Las Cañadas y en las zonas adyacentes, así como su evolución temporal y espacial.
- Estudiar la composición química e isotópica de los solutos, así como de los gases disueltos en el acuífero de Las Cañadas, con el fin de entender y cuantificar la influencia de los aportes externos (i.e. lluvia) e internos (i.e. aporte de gases endógenos) en las características geoquímicas del acuífero.
- Estudiar los procesos de interacción agua-roca-gas mediante un modelado hidrogeoquímico con el fin de explicar la composición químico-física final de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas.
- Caracterizar el origen de los gases disueltos en las aguas subterráneas e identificar las regiones del acuífero con una mayor conexión al sistema volcánico-hidrotermal del Teide.
- Establecer las características geoquímicas actuales del acuífero a fin de detectar cualquier comportamiento anómalo en el futuro debido a contaminación meteórica, magmática o antropogénica.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

En la presente tesis doctoral se ha seguido una estructura lógica de acuerdo con los objetivos planteados, dividiéndola en 7 capítulos. A continuación se resume el contenido de cada capítulo.

En este **Capítulo I** se presentan los objetivos generales del trabajo de investigación sobre el modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas, seguido de una descripción del marco geológico e hidrogeológico donde se encuentra localizado este acuífero volcánico y de una descripción detallada del mismo. Finalmente, se hace una descripción de los estudios previos más importantes que se han realizado en el área de estudio.

En el **Capítulo II** se describen los diferentes pasos llevados a cabo para la elaboración del modelo físico del acuífero de Las Cañadas. Se creó una base de datos partiendo de una revisión exhaustiva de toda la información geológica, hidrogeológica y geofísica disponible sobre la geometría de la zona saturada del acuífero de Las Cañadas. Posteriormente, con la ayuda de un sistema de información geográfico, se procedió a georeferenciar e integrar dicha información, realizando diferentes perfiles hidrogeológicos con el fin de validarla y de obtener un modelo en 3-D del medio físico poroso del acuífero de Las Cañadas.

En el **Capítulo III** se presenta el estudio geoquímico de la recarga a través de la caracterización química e isotópica de las precipitaciones a lo largo de una sección que atraviesa el acuífero de Las Cañadas de norte a sur, estimando el origen de la salinidad, cuantificando la aportación atmosférica, y obteniendo una nueva línea meteórica local y diferentes gradientes altitudinales.

El **Capítulo IV** está estructurado en varias secciones que tratan de dar una visión de conjunto de la geoquímica de las aguas subterráneas desde una multidisciplinariedad que es necesaria, dada la complejidad del sistema. En este capítulo se estudian las características físico-químicas e isotópicas de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes a través de la aplicación de diferentes técnicas geoquímicas, haciendo especial hincapié en los procesos de interacción agua-roca-gas y la conexión con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide. En este capítulo también se ha estimado la descarga subterránea de dióxido de carbono a través del acuífero de Las Cañadas, comparándola con otros acuíferos volcánicos del mundo.

El **Capítulo V** consiste en el estudio geoquímico de los gases disueltos en las aguas subterráneas del acuífero. Este estudio ha permitido comprobar que el control espacial de los mismos puede resultar una herramienta muy útil para la comprensión de la circulación del agua subterránea en el acuífero y para determinar los procesos de interacción agua-roca-gas que tienen lugar en su seno. Este estudio también ha permitido determinar las posibles zonas de mayor conexión con el sistema volcánico-hidrotermal del Teide.

El **Capítulo VI** consiste en la estimación de la recarga de agua al acuífero a través de un balance de cloruros en el área de la Caldera de Las Cañadas, comparando los resultados

con los obtenidos por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) mediante el Modelo Hidrológico de Superficie (MHS).

En el **Capítulo VII** se presenta la discusión final de los principales resultados obtenidos en los capítulos precedentes que han permitido elaborar el Modelo Hidrogeoquímico final del acuífero de Las Cañadas del Teide. Al final de este capítulo se exponen las conclusiones y se proponen nuevas ideas para futuros trabajos.

Finalmente se presentan las referencias, los anexos y las publicaciones derivadas de este trabajo de investigación.

1.4. DATOS BÁSICOS DE TENERIFE

1.4.1. SITUACIÓN Y EXTENSIÓN

El Archipiélago Canario está formado por un total de siete islas: Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro, además de por un pequeño grupo de islotes al norte de Lanzarote conocido como el Archipiélago Chinijo, así como por numerosos montes submarinos (Figura 1.1.). El Archipiélago Canario, junto con Azores, Madeira, Cabo Verde y Las Salvajes, comprende el conjunto de archipiélagos atlánticos que forman la Macaronesia, todos de origen volcánico. Tenerife (2034 km²) es la mayor de las siete islas del Archipiélago Canario y está situada entre el paralelo 28° y el 29° N y el meridiano 16° y 17° O, ligeramente al Norte del Trópico de Cáncer, y ocupa una posición central entre las islas de Gran Canaria y La Gomera. La isla se encuentra a algo más de 300 km del continente africano (Figura 1.1.) y a unos 1300 km de la Península Ibérica.



Figura 1.1. Marco geográfico regional de las Islas Canarias donde también se pueden observar los archipiélagos de Madeira y Las Salvajes y los montes submarinos cercanos (en letras blancas). [www.earth.google.es].

1.4.2. FISIOGRAFÍA

En general, Tenerife tiene una forma similar a un tetraedro aplastado, cuyos ejes son tres dorsales volcano-estructurales y cuyo vértice superior aparece truncado por la Caldera de Las Cañadas del Teide. En el margen septentrional de la misma se alza el Complejo Volcánico Teide-Pico Viejo, que con sus 3718 m.s.n.m. es el punto más elevado del territorio nacional. La isla de Tenerife creció sobre un basamento oceánico profundo de casi 3000 m de profundidad (Watts y Masson, 1995), por tanto, Tenerife tiene casi 7000 m de altura desde el fondo oceánico, convirtiéndose en el tercer edificio volcánico más grande del mundo.

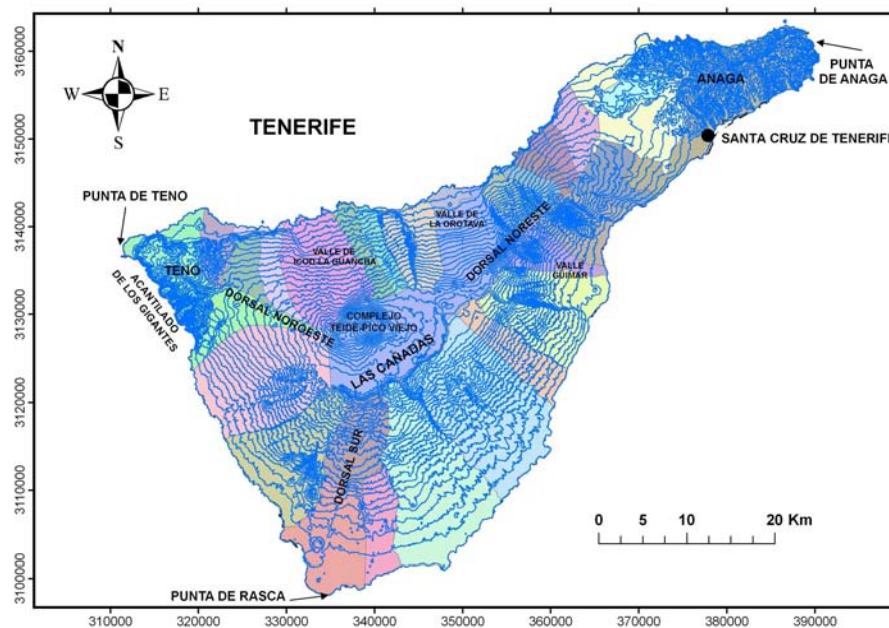


Figura 1.2. Mapa de Tenerife con las principales características fisiográficas comentadas en el texto. Curvas de nivel cada 100 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N

Los vértices de la base del tetraedro están constituidos por la Punta de Anaga en el Noreste, la de Rasca en el Sur, y la de Teno en el Oeste (Figura 1.2.) Las costas son ásperas y abruptas, formando con gran frecuencia acantilados rocosos con muy pocas playas y puertos naturales. El relieve de Tenerife es muy abrupto pero poco abarrancado salvo en Teno y Anaga, dando como resultado un territorio lleno de fuertes contrastes: desde la inmensa planicie de la Caldera de Las Cañadas hasta los Acantilados de Los Gigantes con sus paredes verticales (Figura 1.3.), pasando por amplios valles como el de La Orotava o Güimar, o por los macizos basálticos de Anaga y Teno, surcados por profundos barrancos.



Figura 1.3. Foto de un sector de la pared de los Acantilados de Los Gigantes en el T.M. de Santiago del Teide que forman parte del Macizo Basáltico de Teno. Se puede apreciar claramente la infinidad de diques que atraviesan las coladas basálticas y los depósitos de piroclastos, con algún nivel de almagre intercalado (color rojizo). [www.webtenerife.com].

El clima de Canarias es en general subtropical, aunque por su latitud le corresponde un clima seco y cálido con escasas precipitaciones. Esta diferencia se debe a varios factores, entre los que destacan los vientos alisios, la orografía, la corriente marina fría de Canarias y las borrascas procedentes de otras regiones. Los vientos alisios, provocados por el anticiclón de las Azores, se mueven sobre la corriente marina fría, manteniéndose frescos y aportando a Canarias unas condiciones de temperatura y humedad típicas de latitudes más septentrionales. Sobre los vientos alisios, de componente NE y que se encuentran entre los 1200 m.s.n.m. y los 1800 m.s.n.m., dependiendo de la época del año, se encuentra otra capa más cálida y seca que ésta, que se mueve en dirección NO, y que impide el ascenso orográfico de los alisios en las islas de mayor relieve como Tenerife. El límite inferior de esta capa se le conoce como zona de "inversión térmica". Este fenómeno provoca la formación del llamado "mar de nubes" en la vertiente de barlovento, en torno a los 1500 m.s.n.m., por encima de la cual los cielos están despejados.

El régimen de los alisios es constante durante gran parte del año, favoreciendo las temperaturas suaves, una humedad moderada alrededor del 70% y relativamente escasas precipitaciones, que se limitan a las zonas afectadas por el mar de nubes. En las épocas que cesa el flujo del alisio, preferentemente durante el invierno, las condiciones climáticas pueden variar desde llegadas de aire cálido procedente del Sahara hasta perturbaciones procedentes de latitudes medias e incluso de origen tropical, aunque más escasas, que son las responsables de la mayoría de las precipitaciones (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

Las diferentes situaciones atmosféricas favorecen los contrastes climáticos en Tenerife y la existencia de muchos microclimas en función de la vertiente y de la altitud, desde clima árido o semi-árido en las zonas costeras y especialmente en la vertiente sur de la isla,

hasta un clima de alta montaña en las laderas y cumbres del Teide, pasando por un clima más suave y húmedo en la zona de medianías de la vertiente norte.

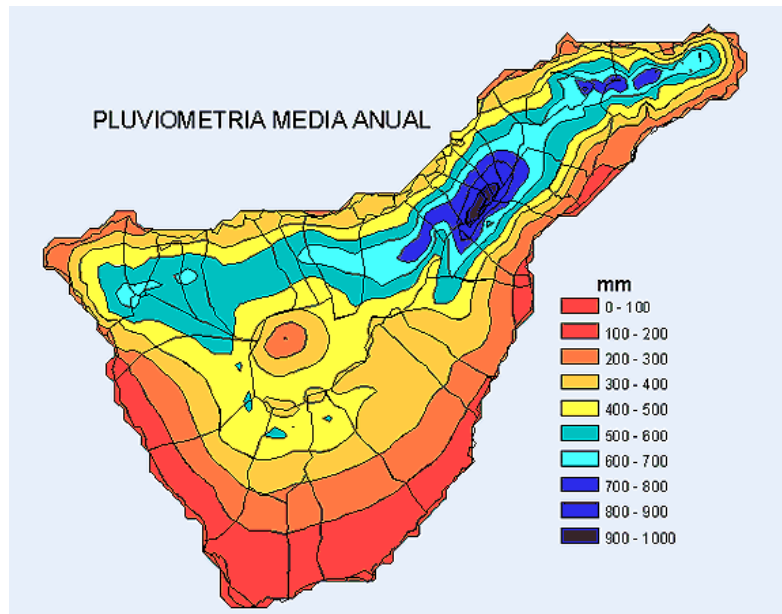


Figura 1.4. Mapa de isoyetas elaborado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife con la pluviosidad media anual del periodo 1986/87-1992/93. [www.aguasdetenerife.org].

La precipitación media insular es de $394 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, aumentando gradualmente desde la costa hasta los 1600-1800 m.s.n.m., a partir de donde se produce la inversión de esta tendencia. El mapa de isoyetas de Tenerife muestra que los máximos pluviométricos se alcanzan en la vertiente norte (alrededor de $1000 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$) mientras que los mínimos los sufre la vertiente sur de la isla (de 80 a $100 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$) (Figura 1.4.) (PHI, 1996). A lo largo del año hidrológico la vertiente sur o de sotavento de Tenerife prácticamente sólo recibe precipitaciones procedentes de fenómenos tormentosos que dejan lluvias intensas pero cuantitativamente menores que en la vertiente norte, donde no sólo se producen precipitaciones relacionadas con las tormentas sino también con el aporte de humedad constante de los vientos alisios (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

1.5. MARCO GEOLÓGICO

1.5.1. CANARIAS

Las Islas Canarias son un archipiélago de origen volcánico asentadas sobre un basamento constituido por corteza oceánica perteneciente a la placa africana (Figura 1.5.) y que ha sido datada, a partir de datos paleomagnéticos, entre 156 y 170 Ma, indicando que la creación de la misma tuvo lugar durante las primeras fases de apertura del Océano Atlántico en el Jurásico Medio (Fase tipo "Mar Rojo") (Roest et al., 1992).

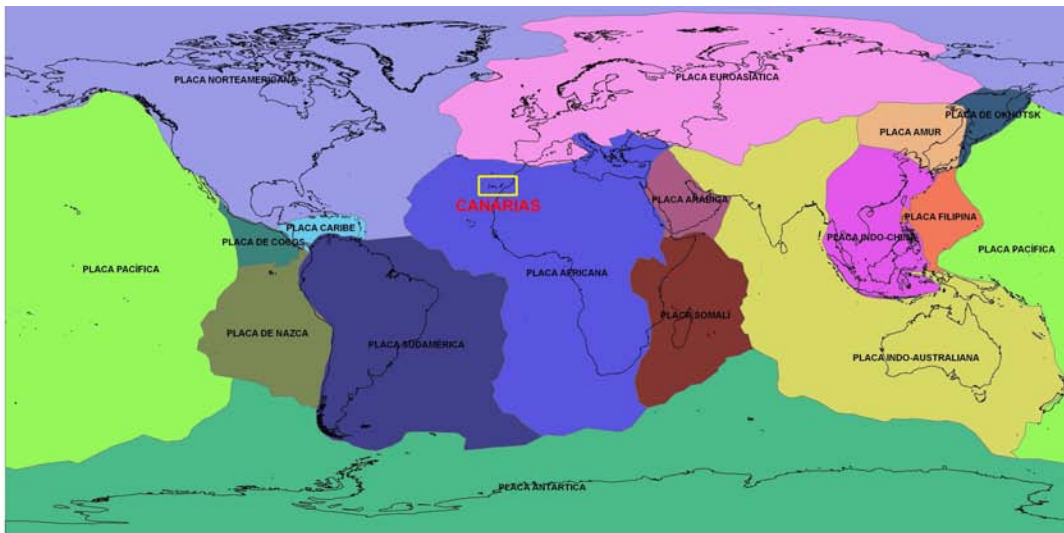


Figura 1.5. Mapa mundial de los continentes y placas tectónicas con la posición de Canarias en el interior de la placa africana (recuadro amarillo).

El vulcanismo en Canarias comenzó hace aproximadamente 70 Ma, aunque las dataciones de las rocas subaéreas más antiguas del archipiélago indican una edad de aproximadamente 20 Ma, y corresponden a los piroclastos subaéreos intercalados entre los sedimentos marinos del complejo basal de Fuerteventura (Balogh et al., 1999). El interior de dicho complejo y posiblemente de todos los montes submarinos que luego dieron lugar a las Islas Canarias, se supone similar, formado por lo que se conoce como complejo basal. Sin embargo, los complejos basales sólo afloran en Fuerteventura, La Palma y La Gomera, aunque se supone que existen complejos basales bajo todas las islas (Carracedo et al., 1999). Los complejos basales están constituidos por intrusiones de rocas plutónicas (sienitas, gabros e incluso carbonatitas) que se enfriaron lentamente en el interior de los montes submarinos, además de por lavas submarinas y sedimentos marinos intercalados entre éstas (Ancochea et al., 1996). A su vez, los complejos basales son considerablemente más antiguos en Fuerteventura (hasta 70 Ma) que en La Gomera (20 Ma) y mucho más que en La Palma (4 Ma) (Anguita et al., 2002).

Al igual que sucede en los complejos basales, la edad de las rocas subaéreas más antiguas va disminuyendo desde las islas más orientales hacia las más occidentales (Guillou et al., 2004) (Figura 1.6.). En Tenerife y Gran Canaria, que poseen una edad intermedia en el conjunto del archipiélago, se puede observar además un volcanismo muy evolucionado con la construcción y posterior destrucción de enormes edificios centrales, que formaron La Caldera de Las Cañadas y la Caldera de Tejedá, respectivamente (i.e. Marti y Gudmunsson, 2000, Guillou et al., 2004).

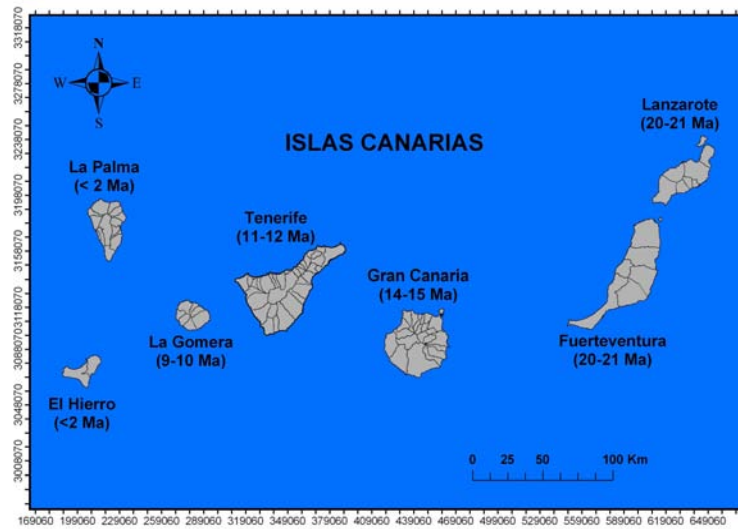


Figura 1.6. Mapa de las Islas Canarias con la edad entre paréntesis de las rocas más antiguas que se han datado del vulcanismo subaéreo (a partir de Guillou et al., 2004). Se observa claramente que la edad de las islas disminuye hacia occidente. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

En función de lo descrito anteriormente, la construcción de las Islas Canarias podría resumirse en las siguientes cuatro fases:

1. Fase submarina con la construcción de los montes submarinos a través de lo que se conoce como complejos basales hace 70 Ma en las islas más orientales y hace sólo 3 Ma en las más occidentales (Anguita et al., 2002).
2. Primera fase subaérea de los complejos basales, produciéndose algunas erupciones hidromagmáticas cuando éstos alcanzan la interfase agua-aire, intercalándose los sedimentos marinos con los primeros depósitos piroclásticos e incluso algunos restos de arrecifes coralinos.
3. Después de un periodo erosivo más o menos intenso en función de cada isla, normalmente inferior a 1 Ma, vuelve a reactivarse el vulcanismo. Sobre los complejos basales, ya en la fase subaérea, se forman los volcanes en escudo, que también son más antiguos los de las islas más orientales (entre 21 y 16 Ma) y más modernos los de las occidentales (entre 2 y 1 Ma) (Guillou et al., 2004). Los volcanes en escudo, de composición predominantemente basáltica aunque en sus fases finales poseen productos

más diferenciados (i.e. fonolitas), pueden alcanzar grandes dimensiones, volviéndose inestables sus flancos con los consiguientes deslizamientos gravitacionales asociados, como el deslizamiento de El Golfo, en la isla canaria de El Hierro (Carracedo et al., 1999).

4. Al finalizar la construcción de los volcanes en escudo y tras una larga etapa de reposo y gran erosión, que varía en cada isla entre 7 y 2 Ma, se vuelve a producir un vulcanismo central que cubre los escudos erosionados y que puede generar, como en el caso de Tenerife y Gran Canaria, enormes edificios estratovolcánicos (Araña et al., 1989; Anguita et al., 1991; Ablay y Marti, 2000; Huertas et al., 2002).

El estadio en el que se encuentra cada una de las Islas Canarias se puede describir en función de estas tres fases. De esta manera, Lanzarote y Fuerteventura estarían en una fase erosiva final post-vulcanismo central, mientras que Tenerife se encuentra en la fase de construcción-destrucción de grandes edificios estratovolcánicos centrales y en Gran Canaria ya cesó dicha fase de construcción. La Gomera, que no ha sufrido erupciones en los últimos 3 Ma, podría estar en la etapa de reposo y de erosión tras la formación del escudo volcánico. Por su parte, La Palma y El Hierro son las islas más jóvenes, y aún no habrían finalizado la etapa de vulcanismo en escudo. Finalmente y gracias a estudios relativamente recientes de los fondos marinos de Canarias (Watts y Masson, 1995, 2001; Romero et al., 2000; Masson et al., 2002), se ha podido observar la existencia de decenas de volcanes submarinos, principalmente al sur de las islas más jóvenes de La Palma y El Hierro, pero también entre Tenerife y Gran Canaria, como el conocido "Volcán de Enmedio" o "Hijo de Tenerife" (Schmincke and Rihm, 1994; Krastel y Schmincke, 2002).

1.5.2. TENERIFE

La historia geológica de Tenerife es una sucesión constante de procesos constructivos y destructivos (Figura 1.7.). Los procesos constructivos estarían representados por el vulcanismo y, en general, se suele diferenciar la fase de escudo basáltico y la fase de vulcanismo central, mientras que los principales procesos destructivos son principalmente los deslizamientos gravitacionales, que han sido observados no sólo en Tenerife sino en todas las islas del Archipiélago Canario (Carracedo, 1999).

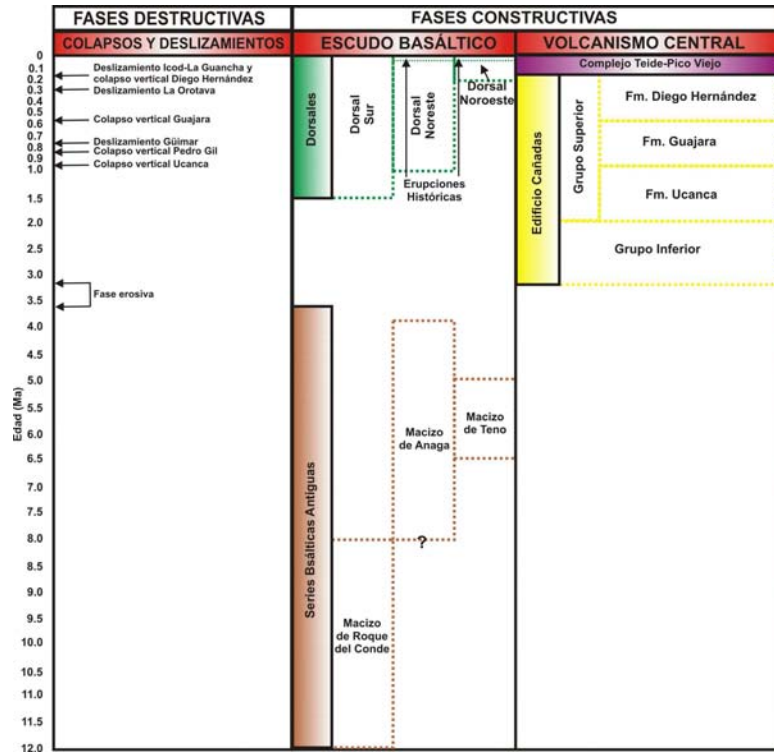


Figura 1.7. Cuadro cronoestratigráfico de Tenerife en el que se puede observar las principales fases constructivas y destructivas de la isla desde el Mioceno hasta la actualidad (modificado de Galindo, 2005).

1.5.2.1. Fases constructivas

1.5.2.1.1. Escudo basáltico

La fase de escudo basáltico comprende las Series Basálticas Antiguas y los sistemas de Dorsales o Rift. Esta fase ha estado activa durante toda la historia geológica de Tenerife ya que abarca desde sus orígenes, hace más de 12 Ma, con la construcción del complejo basal y de los posteriores macizos basálticos, hasta la actualidad con las últimas 4 erupciones históricas asociadas a los sistemas de Dorsales o Rift (Romero, 1991).

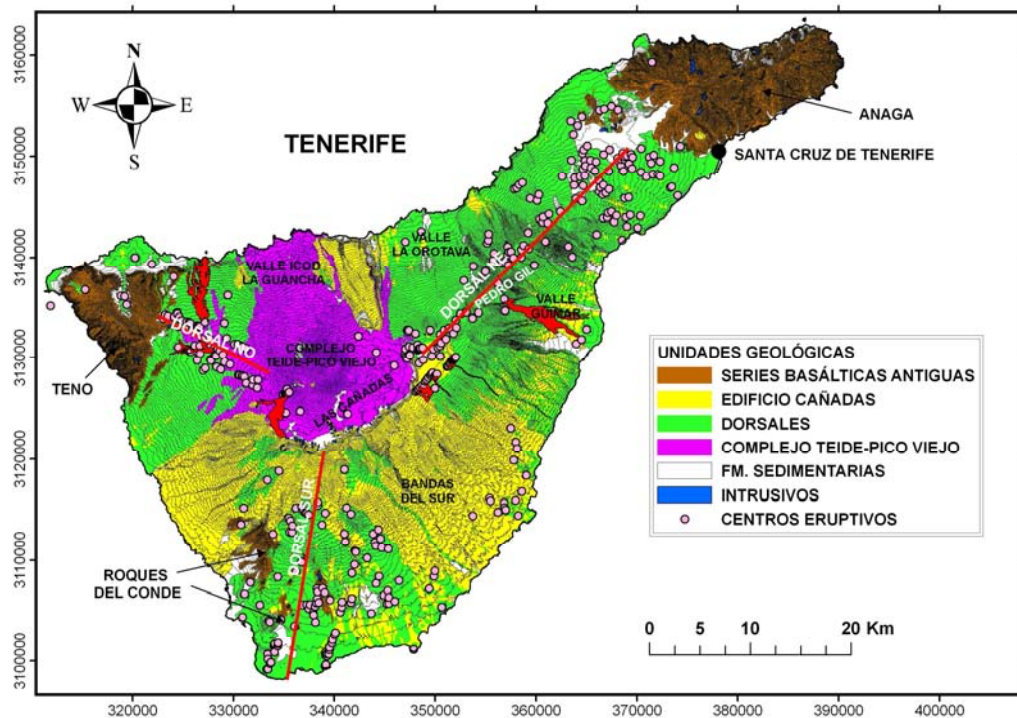


Figura 1.8. Mapa geológico simplificado de Tenerife donde además se representan el sistema de dorsales (líneas rojas) con los centros eruptivos asociados (círculos grises) y las lavas de las erupciones históricas (en rojo). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

■ Series Basálticas Recientes

Aunque se considera que las Series Basálticas Antiguas abarcan desde la formación del Complejo Basal, debido a que éste no ha sido observado en ningún lugar de Tenerife, las rocas datadas más antiguas corresponden a los macizos basálticos de Teno, Anaga y Roque del Conde, con una edad comprendida entre 6,4 y 5,2 Ma, 9 y 3,9 Ma y 11,9 y 8,9 Ma, respectivamente (Abdel-Monem et al., 1972; Ancochea et al., 1990; Thirlwall et al., 2000; Guillou et al., 2004). Estos tres macizos situados en los tres vértices de la isla (Figura 1.8.), corresponden con volcanes en escudo formados por erupciones efusivas fisurales de basaltos alcalinos, ankaramitas y basanitas (Fúster et al., 1968; Ancochea et al., 1990). En las fases finales de los macizos de Teno y Roque del Conde también existen productos félsicos diferenciados (fonolitas), que en el caso del macizo de Anaga están incluso intercalados con los materiales máficos. Mientras algunos autores consideran que en su origen los tres macizos basálticos posiblemente estuvieran separados unos de otros a forma de islas independientes (Ancochea et al., 1990; Thirlwall et al., 2000), otros proponen que son diferentes zonas de un solo edificio volcánico cubierto en su zona central por el Edificio Cañadas (Martí et al., 1994; Carracedo et al., 2007a).

■ Rift o Dorsales

Una vez terminada la construcción de los tres macizos basálticos y tras un periodo de tiempo relativamente largo (entre 3,9 y 1,5 Ma), en el que el vulcanismo en Tenerife se concentraba en la zona central de la isla (Figura 1.7.), se empezó a desarrollar un sistema de

tres dorsales o rifts, que, discordantes sobre los macizos basálticos, unen cada uno de los vértices de la isla con el edificio central (Figura 1.8.). Este sistema de tres dorsales en estrella separados aproximadamente 120° entre sí, típico de los procesos de ruptura del material cuando se produce la intrusión de un gran volumen de magma (Carracedo, 1994; Walter et al., 2004; Galindo, 2005), está formado por las dorsales Sur, Noreste y Noroeste (Figura 1.8), cuya actividad va desde los 1,5, 0,9 y 0,2 Ma respectivamente, hasta la actualidad (Figura 1.7.). Los productos fueron emitidos en las dorsales generalmente a través de erupciones fisurales tipo estromboliano. Su composición química es bastante homogénea, aunque varían desde los extremos, donde son eminentemente basaltos, hacia la zona de intersección, donde aumenta el porcentaje de traquibasaltos (Navarro, 1995).

La estructura de las dorsales Noroeste y Sur es relativamente sencilla, con diques y fisuras eruptivas orientadas ONO-ESE y NNE-SSO, respectivamente, mientras que la dorsal Noreste es bastante más compleja debido a la existencia del edificio estratovolcánico de Pedro Gil (Figura 1.8.) en su eje estructural que rompe las estructuras típicas con dirección NE-SO de la dorsal (Galindo, 2005). El edificio Pedro Gil alcanzaba originalmente los 2000 m.s.n.m. y tenía en torno a 900 m de diámetro de base, pero hace 0,81 Ma se produjo un colapso vertical del techo formando una caldera de 1.5 km de diámetro y 700 m de profundidad y que se postula que está relacionado (causa o consecuencia) con el deslizamiento gravitacional de Güimar (Galindo, 2005) (Figura 1.7.).

1.5.2.1.2. Volcanismo central

Una vez finalizado el volcanismo en escudo en los vértices de Tenerife, hace aproximadamente 3,5 Ma y al mismo tiempo que los macizos basálticos eran erosionados intensamente, en la zona central de la isla se formaron cámaras magmáticas someras, permitiendo un volcanismo que evolucionó químicamente desde las fases iniciales de magmas basálticos hacia otros finales de composición fonolítica, y que perdura hasta la actualidad (Araña, 1971; Ancochea et al., 1990; Martí et al., 1994). Esta fase de volcanismo central dio lugar a sucesivos y gigantes estratovolcanes que se diferencian en Edificio Cañadas y Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV).

■ Edificio Cañadas

El Edificio Cañadas, que permaneció activo desde los 3,3 Ma hasta los 0,196 Ma (Huertas et al., 1994; Edgar et al., 2005), representa la primera y más importante facción del volcanismo central en Tenerife (Figura 1.7.). Los productos del Edificio Cañadas afloran en la pared de Las Cañadas, en la mitad sur de la isla y en el Macizo de Tigaiga, pero además se pueden encontrar intercalados con los materiales de las dorsales en gran parte de la isla (Figura 1.8., 1.9. y 1.10). El volcanismo del Edificio Cañadas está relacionado con cámaras magmáticas someras que permiten la evolución de los magmas basálticos hacia magmas fonolíticos y que generan erupciones con un alto índice de explosividad (Mitjavila y Villa, 1993; Martí et al., 1994; Bryan et al., 1998; Martí y Gudmundsson, 2000; Wolff et al., 2000; Edgar, 2003). La construcción del Edificio Cañadas no ha sido continua en el tiempo, sino que se ha visto

interrumpida por prolongados lapsos de calma eruptiva y destrucción, identificables en el terreno y utilizados por los diferentes autores como criterios de separación de unidades estratigráficas (Martí et al., 1994).

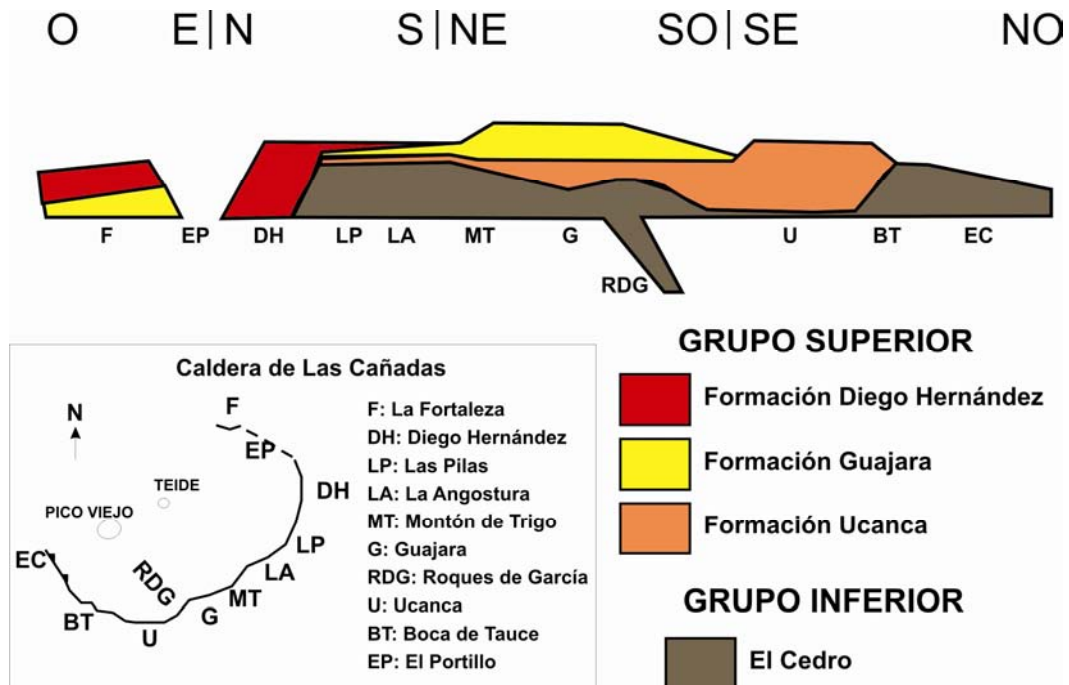


Figura 1.9. Esquema simplificado de la estratigrafía del Edificio Cañadas a lo largo de toda la pared de la Caldera de Las Cañadas (ver mapa de situación en el recuadro inferior izquierdo). Modificado de Galindo (2005), según Martí et al. (1994).

Siguiendo el estudio de Martí et al. (1994), el Edificio Cañadas ha sido subdividido cronoestratigráficamente en Grupo Inferior y Grupo Superior. El Grupo Inferior (3,3 a 2,1 Ma), está constituido principalmente por lavas de basaltos plagioclásicos y en su fase final por fonolitas, incluyendo depósitos de tobas soldadas; aflora a lo largo de gran parte de la zona inferior interna de la pared de la caldera y en los Roques de García, pero principalmente en el sector más occidental de la pared (Cañada de El Cedro) y en sus laderas externas (Figura 1.10.). Los Roques de García representan un espolón de la pared de la caldera, que corresponde a materiales del Grupo Inferior intruídos por numerosos diques fonolíticos.

El Grupo Superior (1,5 a 0,196 Ma) está constituido principalmente por rocas fonolíticas con algunas intercalaciones de materiales basálticos y traquibasálticos. Este grupo aflora en la parte superior de la pared de Las Cañadas, en algunas ocasiones de forma discordante sobre los depósitos del Grupo Inferior (Figura 1.9.), además de en el Macizo de Tigaiga y en los flancos suroeste, sur, sureste y norte de la isla (Ibarrola et al., 1993; Fúster et al., 1994; Martí et al., 1994; Bryan, 1998; Huertas et al., 2002; Edgar, 2003; Edgar et al., 2005) (Figura 1.10.). El Grupo Superior a su vez está subdividido en tres formaciones principales y sucesivas en el tiempo como son la Formación Ucanca (1,54 a 1,07 Ma), la Formación Guajara (0,85 a 0,57 Ma) y la Formación Diego Hernández (0,37 a 0,196 Ma) (Ancochea et al., 1990; Martí et al., 1994; Edgar et al., 2005). Cada una de estas formaciones

ha sido relacionada con ciclos constructivo-destructivos de edificios estratovolcánicos fonolíticos en la zona central de Tenerife y con su posterior colapso vertical (Martí et al., 1994; Martí y Gudmundsson, 2000). Los depósitos ignimbríticos y pumíticos asociados al Grupo Superior que forman las "Bandas del Sur" y que en algunos casos han cubierto gran parte de Tenerife (Figura 1.10.), han sido vinculados a fenómenos extremadamente violentos provocados por la destrucción de los edificios estratovolcánicos a través de los repetidos colapsos de caldera (Martí et al., 1994; Bryan et al., 1998; Edgar, 2003; Edgar et al., 2005).

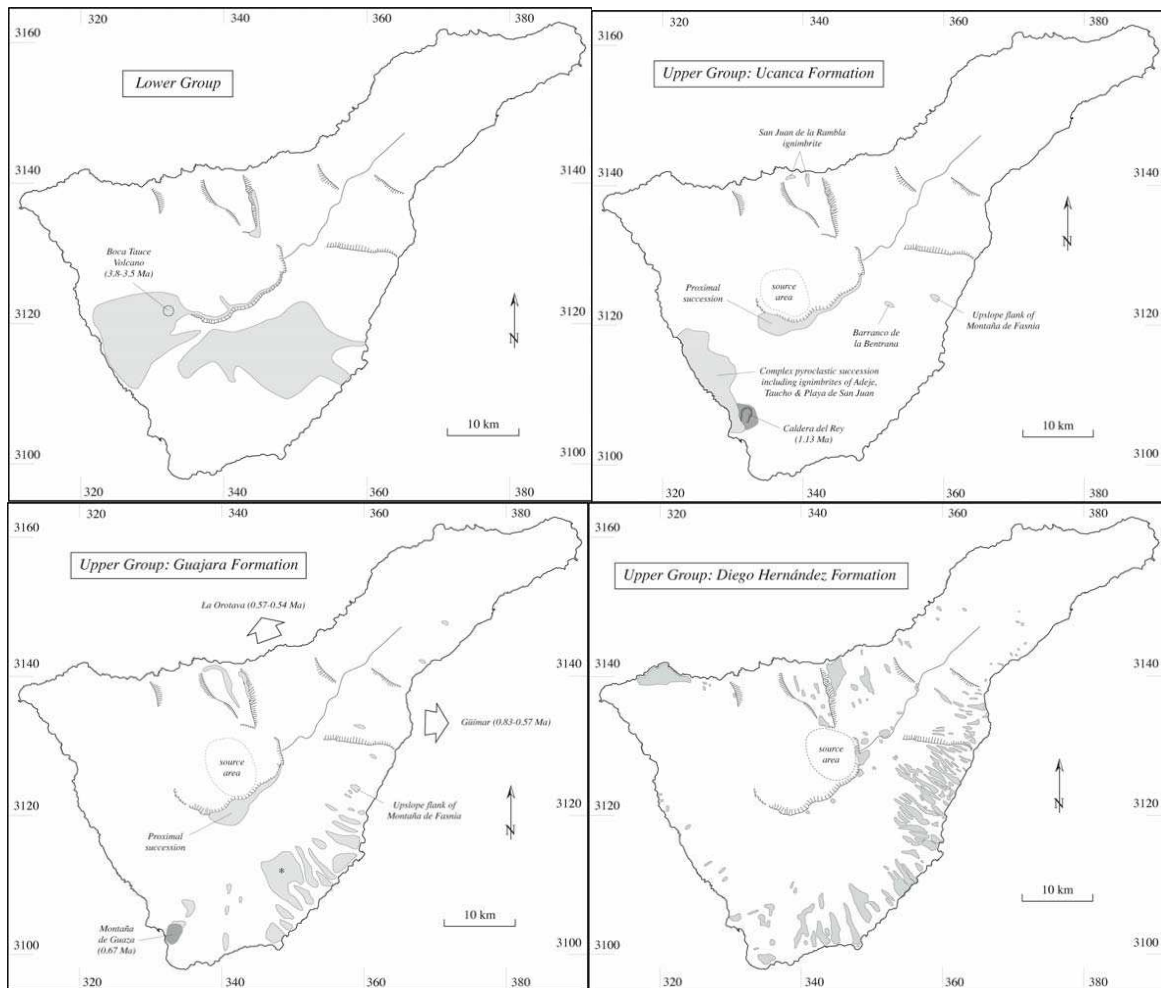


Figura 1.10. Mapas de los afloramientos actuales del Edificio Cañadas diferenciando entre Grupo Inferior (Lower Group) y Grupo Superior (Upper Group). A su vez el Grupo Superior ha sido subdividido en tres formaciones ordenadas cronológicamente como: Ucanca, Guajara y Diego Hernández. Extraído de Cas et al. (2005). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

■ Origen de la Caldera de Las Cañadas

Los ciclos constructivos-destructivos del Edificio Cañadas han dado origen en el centro de Tenerife a la Caldera de Las Cañadas, una depresión semi-elíptica con forma de herradura de 16 km de eje mayor, 9 km de eje menor y 45 km de perímetro, presentando en el sur una parte visible de unos 23 km de longitud y abierta en su margen septentrional (Figura

1.11.). La génesis de esta depresión es motivo de numerosas discusiones científicas debido a las diferentes hipótesis que existen sobre ella, como las de explosión, erosión, colapso vertical y deslizamiento lateral. No obstante, las últimas investigaciones se centran en dos de ellas, que se expondrán sucintamente a continuación:

A. Deslizamiento lateral (Bravo, 1962; Coello, 1973; Navarro y Coello, 1989; Ancochea et al., 1990, 1999; Carracedo, 1994; Navarro, 1995; Watts y Mason, 1995, 2001; Cantagrel et al., 1999; Arnaud et al., 2001; Masson et al., 2002; Márquez et al., 2008): debido al crecimiento del Edificio Cañadas hasta superar su pendiente de equilibrio y a la alteración hidrotermal de su base, sus flancos pasaron a ser físicamente inestables, produciéndose uno o varios deslizamientos laterales hacia el norte de la isla cuya cabecera sería aproximadamente la actual pared de la Caldera de Las Cañadas (Figuras 1.12 y 1.13).

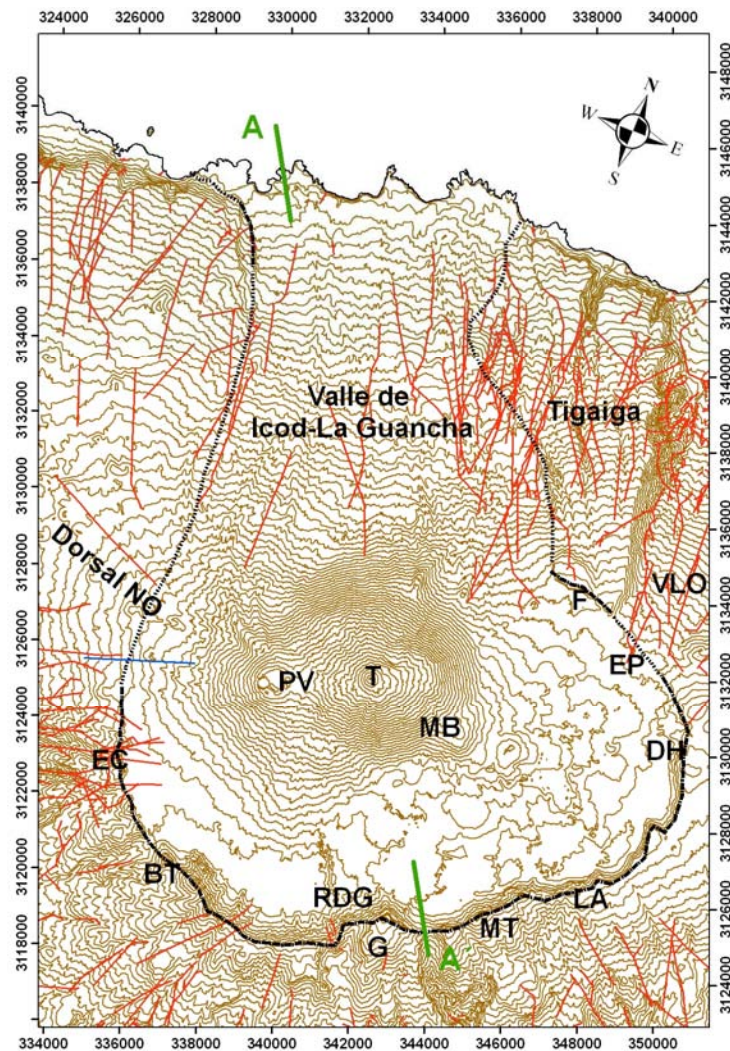


Figura 1.11. Mapa topográfico de la caldera de Las Cañadas y del Valle de Icod-La Guancha donde se han representado los límites del deslizamiento lateral de Las Cañadas, tanto la parte visible (trazo discontinuo grueso) como la inferida por varios autores (trazo discontinuo fino) (Navarro, 1995; Carracedo, 2007a). También se han dibujado las trazas de las galerías de agua de la zona (en rojo) y de la galería Río de Guía (azul). EC: El Cedro; BT: Boca de Tauce; RDG: Roques de García; G: Guajara; MT: Montón de Trigo; LA: La Angostura; LP: Las Pilas; DH: Diego Hernández; EP: El Portillo; VLO: Valle de La Orotava; F: Fortaleza; MB: Montaña Blanca; T: Teide; PV: Pico Viejo. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

Este fenómeno, que se supone se produjo entre 0,2 y 0,15 Ma (Carracedo et al., 2007a), habría descomprimido la cámara magmática fonolítica somera, generando una o varias erupciones extremadamente explosivas cuyos depósitos se observan en la mayor parte de la isla. En la base de este deslizamiento se formó una brecha caótica de matriz limo-arcillosa, con bloques métricos de fonolitas, basaltos y diques del Edificio Cañadas, y que presenta espesores de 200 a 300 metros según la zona (Bravo, 1962; Coello, 1973; Navarro y Coello, 1989; Navarro y Farrujia, 1989; Ibarrola et al, 1993; Carracedo et al., 2007a; Márquez et al., 2008). Esta capa, de comportamiento plástico, que se observa en varias galerías y pozos del Valle de Icod-La Guancha, como se verá en el capítulo 2 de la presente tesis, fue descrita por primera vez por Bravo (1962) como un “fanglomerado” por su semejanza con un conglomerado rico en limos y arcillas (fango), pero se le conoce popularmente con el nombre de “mortalón” por su semejanza con la mortadela (Figura 1.13.). El “mortalón” incluye restos bien conservados de árboles, confirmando que su formación ha debido producirse a baja temperatura (Anguita et al., 2002). Aunque puede parecerse a un depósito de lahar, la composición limo-arcillosa de la matriz es demasiado fina.

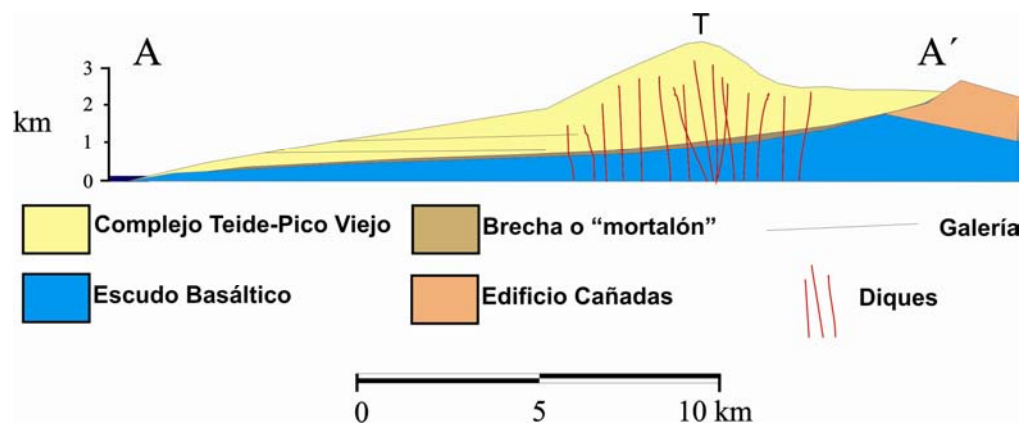


Figura 1.12. Corte geológico simplificado de la caldera de Las Cañadas del Teide y del Valle de Icod-La Guancha, según el modelo de deslizamiento lateral. (Modificado de Martí, 2004). Ubicación del corte en la 1.11.



Figura 1.13. Detalle de un afloramiento del “mortalón” realizada durante una visita al interior de una galería del Valle de Icod-La Guancha. Se puede observar claramente los clastos de diferentes tamaños (de color más oscuros) embebidos en la matriz arcillosa (de color más claro). El forro de una cámara de fotos sirve de escala.

B. Colapso vertical (Fuster et al. 1968; Araña, 1971; Martí et al., 1994, 1997; Aubert y Kieffer, 1996, 1998; Bryan et al., 1998; Ablay y Hürlimann, 2000; Ablay y Kearey, 2000; Martí y Gudmundsson, 2000; Pous et al., 2002; Coppo et al., 2008a, 2008b): según esta hipótesis, la actual caldera de Las Cañadas del Teide se habría formado tras tres sucesivos colapsos verticales de los edificios volcánicos de Ucanca, Guajara y Diego Hernández, hace 1,1, 0,57 y 0,19 Ma, respectivamente. El colapso de cada edificio tiene lugar por el vaciado, tras consecutivas erupciones, de la cámara magmática que lo alimenta en profundidad, al no poder soportar ésta los esfuerzos verticales que genera el propio peso del material suprayacente. De esta forma habría al menos tres calderas concéntricas cuya base está a diferentes cotas pero que están prácticamente ocultas por los materiales de relleno del CTPV. Esta hipótesis admite la formación por deslizamiento lateral del Valle de Icod-La Guancha y de la presencia del “mortalón” fuera del ámbito de Las Cañadas, ya que la cabecera del mismo no estaría en la pared de la caldera sino que pasaría aproximadamente bajo el actual CTPV (Ablay y Martí, 2000; Martí y Gudmundsson, 2000) (Figuras 1.14 y 1.15).

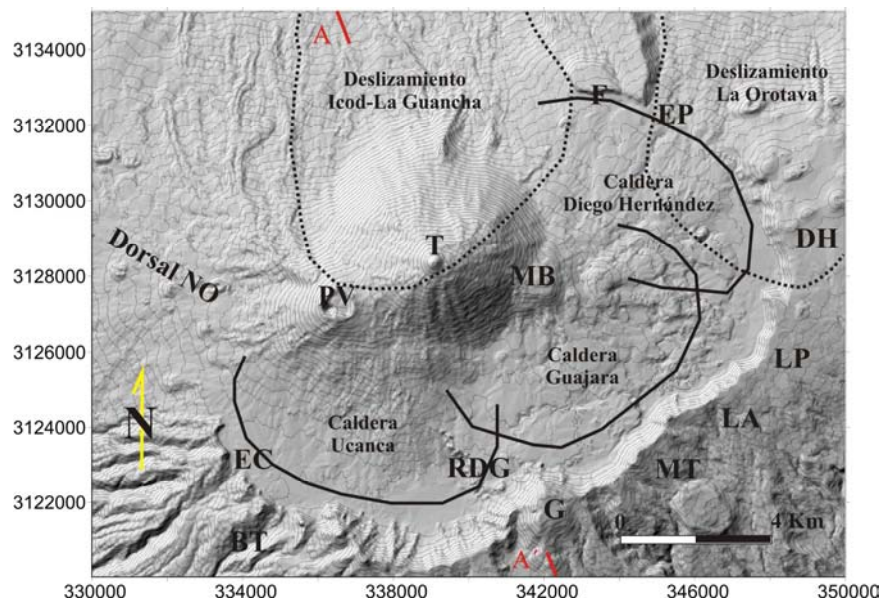


Figura 1.14. Mapa de sombras de la caldera de Las Cañadas con los límites sobreimpuestos de las tres calderas de colapso (líneas continuas) y de los valles de deslizamientos (líneas discontinuas). Modificado de Martí y Gudmundsson (2000). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

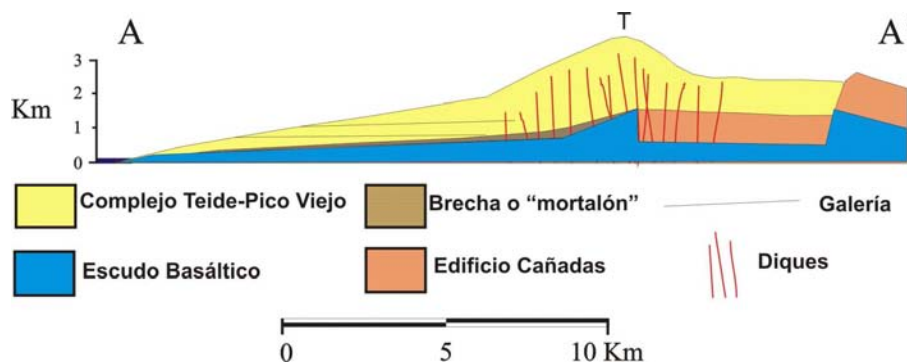


Figura 1.15. Corte geológico simplificado de la caldera de Las Cañadas del Teide y del Valle de Icod-La Guancha, según el modelo de colapso vertical. (Modificado de Martí, 2004). Ubicación del corte en Figura 1.13.

Independientemente del origen de Las Cañadas, según estudios volcano-estructurales recientes (Galindo, 2005) se postula que los límites de las calderas de colapso de los edificios de Ucanca y Guajara, o la cabecera del deslizamiento lateral en la zona de Ucanca y de Los Roques de García, no coinciden con la posición actual de la pared de la caldera debido a que ésta se ha ido erosionando con el tiempo y retrocediendo hacia el sur.

■ Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV)

La última fase del volcanismo central la protagonizó la construcción del enorme Complejo Volcánico Teide-Pico Viejo (CTPV), conformado por los estratovolcanes superpuestos del Teide y de Pico Viejo, que se asientan sobre el margen septentrional de la Caldera de Las Cañadas, así como de una serie de centros adventicios de composición intermedia-ácida (Figura 1.16.). La actividad del CTPV comenzó hace aproximadamente 0,2 Ma tras el deslizamiento del Valle de Icod-La Guancha y continúa hasta la actualidad (Ablay y Martí, 2000; Carracedo et al., 2007a).

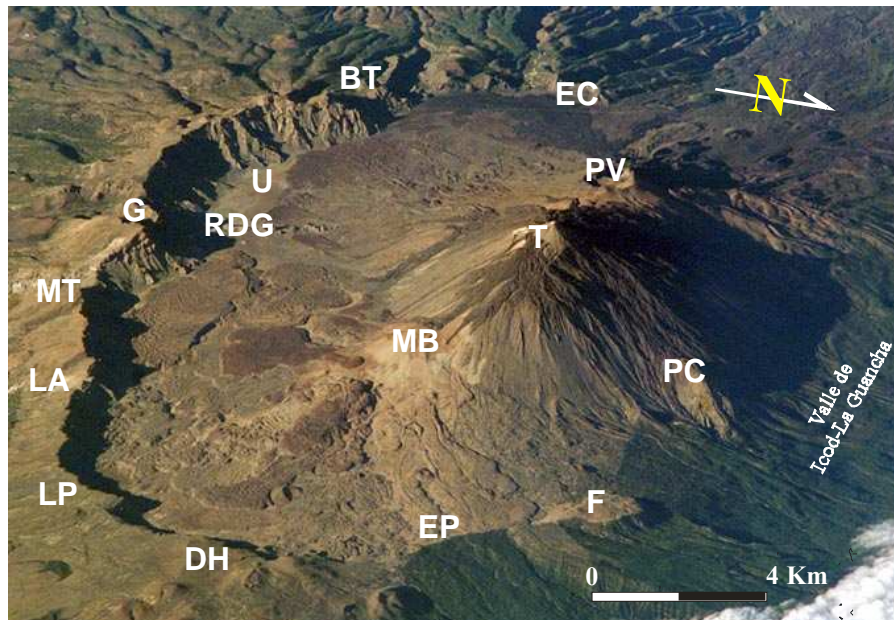


Figura 1.16. Vista satelital de la caldera de Las Cañadas y del CTPV en su margen septentrional. Fuente: NASA. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. PC: Pico Cabras.

Los depósitos del CTPV afloran en toda la superficie del Valle de Icod-La Guancha y en el interior de la Caldera de Las Cañadas, cubriendo también parte del dominio más próximo de la Dorsal Noroeste y un área reducida del Valle de La Orotava (Figura 1.8.). Según los estudios geocronológicos y litoestratigráficos recientes (Ablay et al., 1998; Ablay y Martí, 2000; Carracedo et al., 2007a) la historia geológica del CTPV se puede resumir en los siguientes eventos:

1. Entre 0,2 y 0,15 Ma tiene lugar el último deslizamiento/colapso en el Edificio Cañadas, que por descompresión reactiva la cámara magmática somera que lo

alimentaba favoreciendo la generación y/o entrada de nuevo magma. A través de la emisión de lavas de composición basanítica y basáltica se empezó a construir rápidamente un nuevo edificio en el flanco norte de Las Cañadas conocido como "Pre-Teide". Estos depósitos se superponen, al menos en el Valle de Icod-La Guancha, a la brecha producto del deslizamiento conocida como "mortalón".

2. Al igual que posiblemente sucedió con los grandes edificios volcánicos centrales (Ucanca, Guajara y Diego Hernández), el crecimiento de un nuevo edificio central favoreció el mayor tiempo de residencia de los magmas en el reservorio magmático somero, permitiendo la cristalización fraccionada del mismo y, por tanto, la generación de magmas primero traquibasálticos y finalmente fonolíticos que caracterizaron las erupciones en los siguientes 0,12 Ma (de 0,15 a 0,03 Ma). A partir de los 0,03 Ma y hasta prácticamente la actualidad, el estratovolcán Teide tan sólo ha tenido una erupción que se produjo entre el año 660 y 940 d.C. (Carracedo et al., 2007b). Esta erupción efusiva de carácter fonolítico, que forma el cono de cumbre del Teide y cubre parte de sus flancos en todas las direcciones, se conoce como erupción de "Lavas Negras".

3. Debido al aumento de la presión litostática, por el crecimiento del estratovolcán Teide, y a la disminución de la presión de gas en el reservorio, posiblemente el magma ya no podía alcanzar el cono de cumbre del Teide y las erupciones se empezaron a producir en su flanco oeste, construyéndose el estratovolcán de Pico Viejo. Las primeras lavas de Pico Viejo, de composición basanítica y edad aproximada de 0,03 Ma (hace 27030 ± 430 años, Carracedo et al., 2007a), cubren el sector Oeste de la Caldera de Las Cañadas y el Valle de Icod-La Guancha, y avanzan sobre los flancos norte y sur de la Dorsal Noroeste (Carracedo et al., 2007a).

4. Al igual que el estratovolcán Teide, los depósitos emitidos por las erupciones de Pico Viejo fueron evolucionando químicamente hacia materiales intermedios (tefritas y fonotefritas) y félsicos (fonolitas). La última erupción datada que ha tenido lugar en el estratovolcán de Pico Viejo fue de carácter fonolítico y se produjo hace 17525 ± 365 años (Carracedo et al., 2007a). En el año 1798 d.C. tuvo lugar en el flanco oeste de Pico Viejo la erupción basáltica de "Chahorra" o "Narices del Teide" (García, 1989; Romero, 1991, 1992), pero debido a las características máficas de los productos emitidos por esta erupción, similares al resto de las erupciones históricas (García, 1989), y el hecho de que se produjera sobre la prolongación de una alineación de centros eruptivos en la Dorsal Noreste, son factores que sostienen que fue una erupción perteneciente al dominio de dicha dorsal aunque se produjera en el flanco oeste de Pico Viejo (Carracedo et al., 2007a).

5. Durante el Holoceno, debido a la disminución de la presión en la cámara magmática y al aumento de la presión litostática por el crecimiento de los dos estratovolcanes, el magma ya tampoco alcanzaba el centro eruptivo de Pico Viejo,

por lo que las erupciones se distribuyeron en el perímetro basal del CTPV, siguiendo una red de fracturas radiales al mismo. Entre 9210 ± 190 años y 1714 ± 151 años antes del presente (tomando como base el año 2007, según Carracedo et al., 2007a), se produjeron hasta 15 erupciones en forma de domos de lava fonolítica, adventicias al CTPV, tales como Pico Cabras o Montaña Blanca (Figura 1.16) (Ablay et al. 1995).

En resumen, la mayor parte de los materiales de relleno de la Caldera y del Valle de Icod-La Guancha emitidos por el CTPV son de naturaleza máfica, quedando limitados los productos más diferenciados (fonolitas, traquitas, etc.) a las capas más superficiales y, por tanto, más recientes de la formación.

1.5.2.1.3. Erupciones históricas

En Tenerife, generalmente se contabilizan un total de 4 erupciones históricas, que son aquellas que han ocurrido desde la llegada de los conquistadores hasta la actualidad: Siete Fuentes-Fasnía-Arafo (1704-1705 d.C.), Arenas Negras (1706 d.C.), Chahorra (1798 d.C.) y Chinyero (1909 d.C.) (García, 1989; Romero, 1991, 1992; Carracedo et al., 2007b) (Figura 1.17). Tal y como se puede observar en la Figura 1.17., todas las erupciones históricas han estado relacionadas con los sistemas de dorsales o rift, de las cuales 3 con la Dorsal Noroeste (Arenas Negras, Chahorra y Chinyero) y tan sólo una con la Dorsal Noreste (Siete Fuentes-Fasnía-Arafo). La dinámica de todas las erupciones históricas ha sido típicamente estromboliana, con la emisión de materiales de composición eminentemente basálticos y sin prácticamente enclaves (García, 1989).

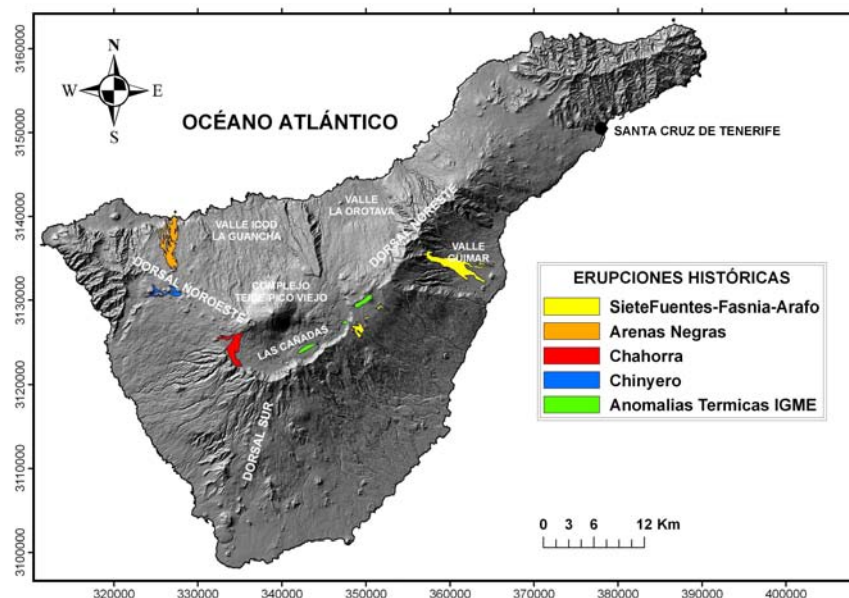


Figura 1.17. Mapa de sombras de Tenerife donde se representan con diferentes colores las coladas de lava de las 4 erupciones históricas y las anomalías térmicas de superficie detectadas por el IGME en sus estudios de prospección geotérmica (IGME, 1983-1993d). Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

Además de estas 4 erupciones históricas, existen algunos autores (Anguita et al., 2002; Carracedo et al., 2007b) que afirman que ha habido al menos otras tres erupciones en tiempos prehistóricos: en el año 1341 d.C., descrita por marineros españoles y de localización indeterminada; en el 1430 d.C., conocida como la erupción de "Taoro", constituida por una alineación NE-SO de tres conos volcánicos en el norte del Valle de La Orotava; en el año 1492 d.C., recogida en el diario de Cristóbal Colón (Colón, 1492) a su paso por la costa de Tenerife y que se conoce con el nombre de "Boca Cangrejo". Esta última se trata de un cono de escorias y ceniza en la Dorsal Noroeste, alineado con las erupciones de "Arenas Negras" y "Chinyero", cuyas coladas casi alcanzaron la costa oeste de Tenerife (Carracedo et al., 2007b). Esta erupción había sido interpretada históricamente como la erupción fonolítica de "Lavas Negras" de la zona sumital del Teide (Soler et al., 1984), pero recientemente ésta erupción ha sido datada de hace 1150 ± 140 años (Carracedo et al., 2007a). Siendo poco precisa y escasa la información disponible aún sobre estas tres erupciones, en el presente estudio se ha asumido que en Tenerife se han producido un total de 4 erupciones históricas:

- **Siete Fuentes-Fasnia-Arafo:** la erupción que ocurrió entre los años 1704 y 1705, tuvo lugar a lo largo de una fractura de aproximadamente 13 km de longitud y dirección N45E, en la que se formaron tres bocas eruptivas claramente diferenciadas: primero se formó la de Siete Fuentes (Figura 1.18), luego la de Fasnia y, por último, la de Arafo (Solana, 1996). Ésta última boca se formó en el interior de la caldera de colapso del estratovolcán de Pedro Gil (perteneciente al sistema de la dorsal Noreste) (Figura 1.8). La alineación de estos tres centros eruptivos es consecuente con la dirección principal de la dorsal Noreste, si bien el primero de ellos (Siete Fuentes) se produjo ya en el ámbito de Las Cañadas, indicando hasta dónde se produce el control estructural de la dorsal Noreste. En Ablay y Martí (2000), también se observa como la alineación de los centros eruptivos de Montaña Blanca en el interior de Las Cañadas cambia desde una dirección radial al CTPV hacia otra paralela al eje de la dorsal Noreste conforme se acerca a la misma. Otra evidencia de la influencia de la dorsal Noreste en el interior de Las Cañadas es la existencia del "Graben de Los Azulejos", un conjunto de fallas normales de dirección NNE-SSO, con la misma dirección que dicha dorsal, en la zona de los Roques de García y que estuvieron activas durante cerca de 0.5 Ma (entre 1.05 y 0.55 Ma) (Ancochea et al., 1990; Martí et al., 1994; Edgar et al., 2005; Galindo, 2005; Galindo et al., 2005). Finalmente, hay que destacar que los estudios de prospección geotérmica llevados a cabo por el IGME en la Caldera de Las Cañadas, detectaron al menos tres zonas con temperaturas del suelo relativamente anómalas respecto a los valores de fondo, que siguen una alineación N55E, muy similar a la erupción de Siete Fuentes-Fasnia-Arafo (IGME, 1983-1993d) (Figura 1.17.).



Figura 1.18. Foto de uno de los centros de emisión (Siete Fuentes) de la erupción histórica de Siete Fuentes-Fasnia-Arafo en 1704-1705. Se puede observar a la izquierda los dos conos de cinder y a la derecha la pequeña colada lávica emitida de color más oscuro.

- **Arenas Negras:** la erupción de "Arenas Negras" o de "Garachico" del año 1706 d.C., tan sólo un año después de la de Siete Fuente-Fasnia-Arafo, se produjo en el flanco norte de la Dorsal Noroeste y fue la única de las erupciones históricas que no fue fisural (García, 1989). Esta erupción de tan sólo 9 días de duración destruyó el puerto natural de la localidad norteña de Garachico, dilapidando la economía de esa próspera comunidad (Romero, 1991, 1992).

- **Chahorra:** en el año 1798 d.C., tuvo lugar la erupción de "Chahorra" o "Narices del Teide" en el flanco oeste del estratovolcán de Pico Viejo, la última que se ha producido en el interior de la Caldera de Las Cañadas del Teide y la de mayor duración y volumen emitido de las erupciones históricas. Como se ha comentado anteriormente, diversos autores la han vinculado a la actividad volcánica de la dorsal Noroeste en vez de al CTPV (Carracedo et al., 2007a).

- **Chinyero:** la última erupción que tuvo lugar en Tenerife, se produjo en el año 1909 d.C. sobre el eje de la dorsal Noroeste. Esta erupción, que se formó a través de una fractura NO-SE, tuvo en su origen hasta nueve centros eruptivos de los cuales sólo tres permanecieron activos los 10 días que duró la erupción (García, 1989).

1.5.2.2. Fases destructivas

El relieve actual de Tenerife es producto tanto de los procesos de construcción antes mencionados, como de los procesos destructivos con los que ha ido alternado en toda la historia geológica de la isla. Los principales procesos destructivos son los deslizamientos laterales y colapsos verticales de grandes dimensiones y que han formado los Valles de La Orotava, Güimar e Icod-La Guancha, entre otros (Bravo, 1962; Fuster et al., 1968a; Araña, 1971; Navarro y Coello, 1989; Ancochea et al., 1990, 1999; Carracedo, 1994, 1999; Martí et al., 1994, 1997; Watts y Mason, 1995, 2001; Teide Group, 1997; Bryan et al., 1998; Cantagrel et al., 1999; Ablay y Hürlimann, 2000; Ablay y Kearey, 2000; Martí y Gudmundsson, 2000; Arnaud et al., 2001; Masson et al., 2002; Pous et al., 2002; Coppo et al., 2008a, 2008b). Sin embargo, también están los procesos destructivos de menor envergadura y más constantes en el tiempo, relacionados con fenómenos de erosión por escorrentía superficial en el interior de la isla,

formando profundos barrancos en el sur de la isla, y con la acción del mar en las costas, favoreciendo la generación de importantes acantilados (i.e. Acantilados de Los Gigantes en el macizo de Teno, Figura 1.3).

Los procesos destructivos de grandes dimensiones que son más fáciles de observar en el relieve de Tenerife, son los valles de Güimar y La Orotava que han tenido lugar en el último millón de años (hace 0,8 Ma y 0,3 Ma, respectivamente) (Figura 1.7) (Galindo, 2005). Sin embargo, muchos de los deslizamientos laterales y colapsos verticales que han tenido lugar en Tenerife son difícilmente observables en superficie, debido a que se encuentran ocultos por los materiales emitidos en erupciones posteriores e incluso afectados por otros nuevos deslizamientos. Gracias a los estudios del subsuelo de Tenerife a través de las visitas al interior de las galerías (Bravo, 1962; Coello, 1973; Navarro y Coello, 1989; Navarro, 1995) y de estudios del fondo oceánico alrededor de la isla y de todo el archipiélago (Watts y Mason, 1995, 2001; Masson et al., 2002), se han podido detectar y caracterizar (dimensiones, volumen de material deslizado, etc.) varios deslizamientos laterales ocultos (i.e. Teno o Anaga). Especialmente interesante es la caracterización de la parte sumergida del deslizamiento de Icod-La Guancha de Masson et al. (2002), por las implicaciones que tiene en la configuración del zócalo del Valle de Icod-La Guancha, ya que a partir de la pendiente de la parte sumergida, Márquez et al (2008) extrapolan la continuación emergida del mismo, al menos, hasta el CTPV.

1.6. MARCO HIDROGEOLÓGICO

El agua en Canarias ha sido y es un recurso natural escaso y por tanto extremadamente valioso para el desarrollo de la sociedad. Según la actualización del Plan Hidrológico Insular de Tenerife en 2004 (www.aguastenerife.org), el consumo de agua en la isla se ha estabilizado (Figura 1.19). Mientras la demanda de la agricultura ha disminuido en los últimos años, aún siendo la principal consumidora, la demanda por parte de la población y del sector turístico se han incrementado considerablemente. En Tenerife, al igual que en el resto de las islas del Archipiélago Canario, los recursos hídricos superficiales son prácticamente inexistentes, siendo las aguas subterráneas las que aportan más del 90 % de los recursos hídricos que se consumen (PHI, 1996) (Figura 1.19).

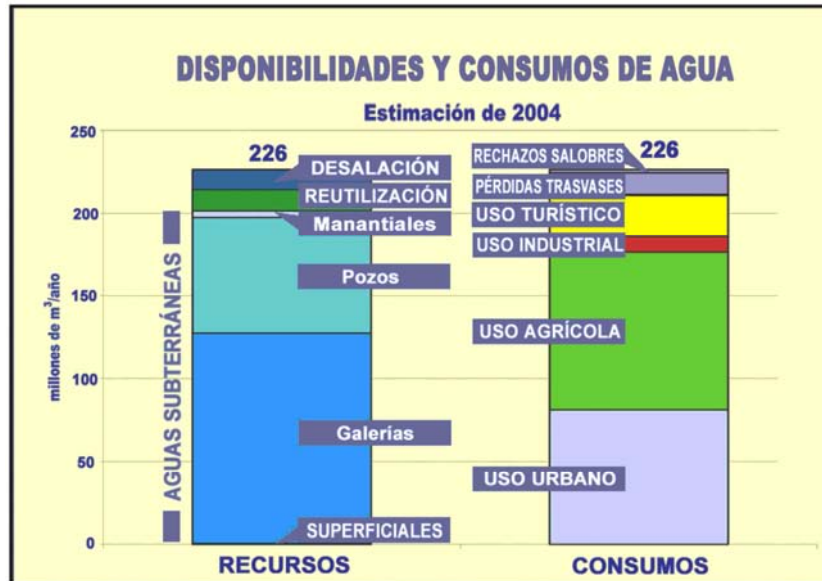


Figura 1.19. Disponibilidad y consumo de agua en la isla de Tenerife (en $\text{hm}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) según el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) en el año 2004. [www.aguastenerife.org].

La captación y explotación de las aguas subterráneas se ha llevado a cabo de una forma particular en cada isla del Archipiélago Canario, unidas a su historia, desarrollo económico y características hidrogeológicas. Desde finales del siglo XIX, el sistema de extracción de agua subterránea más utilizado en Tenerife ha sido el de captaciones subhorizontales o galerías, debido a que el nivel freático se encuentra normalmente a cientos de metros bajo la superficie. Las galerías son túneles subhorizontales con una sección media de 2 m x 2 m y una longitud que varía desde unos pocos metros hasta más de 7 km. Además suelen tener una pendiente positiva aproximada de 5:1000 y una sola entrada o bocamina, pero que puede tener varios ramales o bifurcaciones. En la actualidad en la isla de Tenerife existen 1051 galerías (Figura 1.20) que suman un total de 1705 km perforados, que en el año 2005 aprovechaban un caudal total de $125 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Farrujia, 2007). Esta densa red de galerías, única en el mundo, permiten acceder al subsuelo insular a diferentes cotas y profundidades, convirtiendo a Tenerife en un lugar ideal para desarrollar estudios hidrogeológicos como el de la presente investigación.

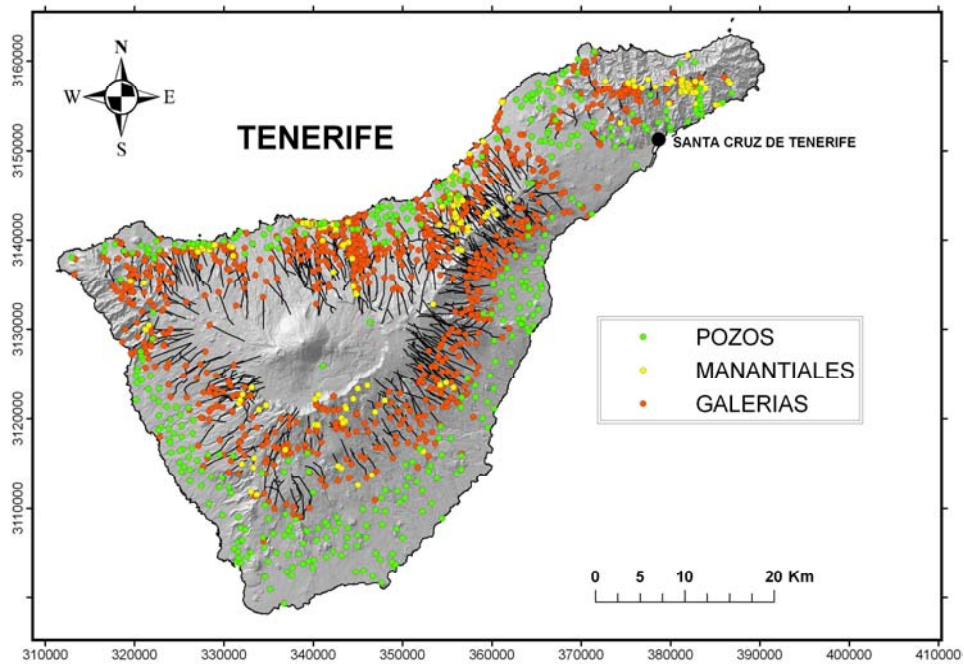


Figura 1.20. Mapa de Tenerife en el que se ha representado las captaciones de aguas subterráneas (pozos y galerías) y los manantiales. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

Aunque el principal método de captación de agua subterránea en Tenerife sea a través de galerías, también existen cerca de 400 pozos, principalmente en las zonas costeras, algunos de más de 300 m de profundidad, que en el año 2005 extraían un caudal total de $63 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Figura 1.21) (Farrujia, 2007). A mediados del siglo XIX se habían contabilizado en Tenerife más de 600 manantiales (o nacientes naturales) repartidos por toda la geografía insular y que extraían un caudal total aproximado de $30 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Farrujia, 2007). Sin embargo, a raíz del descenso del nivel freático por la perforación de pozos y galerías, en la actualidad sólo aquellos que descargan acuíferos colgados no se han secado, proporcionando un caudal total aproximado de $5 \text{ hm}^3/\text{año}$ (PHI, 1996).

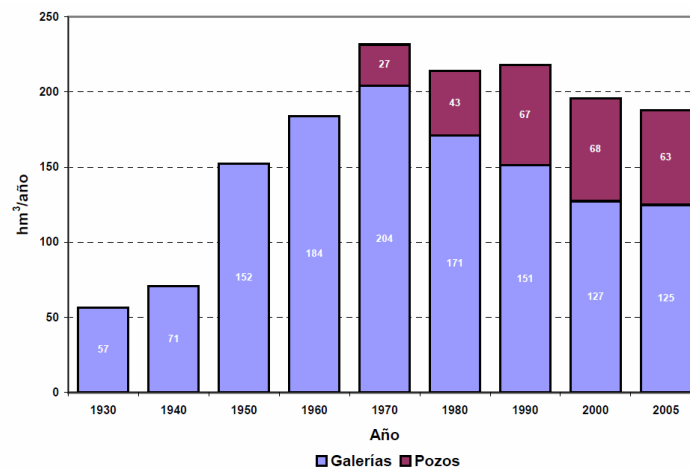


Figura 1.21. Evolución temporal del caudal total extraído por las galerías y pozos del agua subterránea a nivel insular. Extraído de Farrujia et al. (2006).

En el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHI, 1996), la isla fue dividida hidrogeológicamente en 8 zonas (Figura 1.22). Esta zonificación se realizó en función de las diferencias entre volúmenes de recarga, parámetros y comportamiento hidrogeológico, posición o existencia del zócalo impermeable (que a veces es una formación determinada y otras una Serie completa), volúmenes de reserva disponibles y grado de conocimiento. Como dentro de cada zona existen otras diferencias, tanto hidrogeológicas como relativas al tipo de explotación, el CIATFE decidió también dividir cada una de las zonas en subzonas y sectores (7 subzonas y 38 sectores) (Figura 1.22) (PHI, 1996).

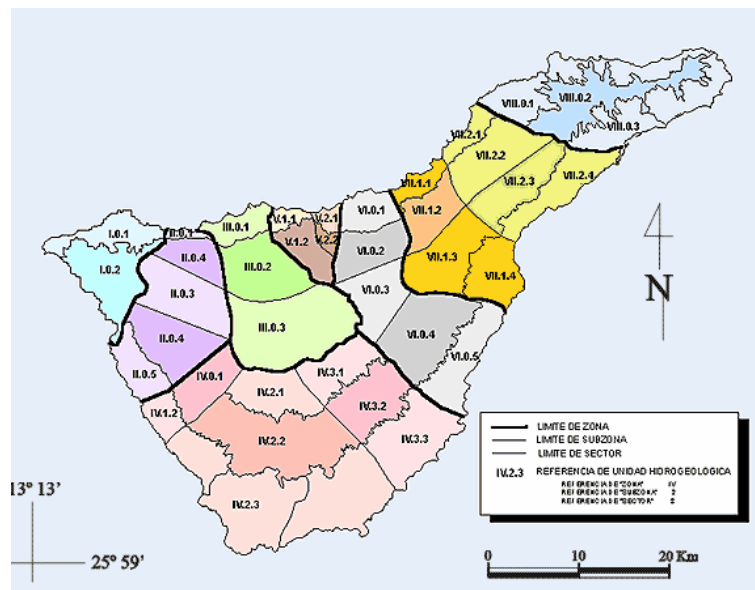


Figura 1.22. Zonificación Hidrogeológica de la isla de Tenerife según el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (modificado del PHI, 1996).

Las reservas hídricas de Tenerife en general se encuentran formando parte de la zona saturada general, salvo excepciones, como algunos acuíferos colgados relacionados con capas impermeables locales. Aunque el medio subterráneo de Tenerife posee una heterogeneidad y anisotropía que favorece que su subsuelo presente una agrupación de muchos acuíferos diferentes (AIH-GE, 1997), desde el punto de vista hidrogeológico la isla de Tenerife se comporta como un único acuífero libre, donde el nivel freático representa con bastante fidelidad la topografía de la isla, aunque con algunas irregularidades impuestas por la estructura geológica del subsuelo (Figura 1.23) (PHI, 1996). La geología del subsuelo de Tenerife también condiciona las características y la distribución del zócalo, por debajo del cual las reservas hídricas son despreciables. Así, el zócalo normalmente está formado por los materiales más antiguos y compactos y de relativamente menor permeabilidad.

A principios del siglo XX, antes del inicio de la explotación intensiva de los recursos hídricos subterráneos en Tenerife, el acuífero insular se encontraba en situación de equilibrio, siendo las salidas (descargas al mar y manantiales principalmente) compensadas por la recarga a través de la precipitación infiltrada (Braojos et al., 1991). Sin embargo desde que comenzó la

explotación intensiva en la década de los años 1920 y 1930, las infiltraciones ya no compensaban las salidas, produciendo un descenso paulatino y continuo de los volúmenes de agua subterránea almacenada (Figura 1.24). No obstante, los niveles del acuífero insular han variado de forma diferente de una zona a otra en función de varios factores: el grado de explotación, el volumen de reservas, la permeabilidad y transmisividad de los materiales del medio poroso, etc. Así en la zona de la Dorsal Noreste, por ejemplo, los descensos acumulados del nivel freático desde el año 1925 hasta la actualidad alcanzan los 500 m, mientras que en el interior del acuífero de Las Cañadas apenas suponen unas decenas de metros (PHI, 1996) (Figura 1.24). Por tanto, mientras en algunas zonas como en la Dorsal Noreste la situación podría calificarse de sobreexplotación, en otras como el acuífero de Las Cañadas, prácticamente no se ha alterado significativamente el equilibrio inicial (Braojos et al., 1991).

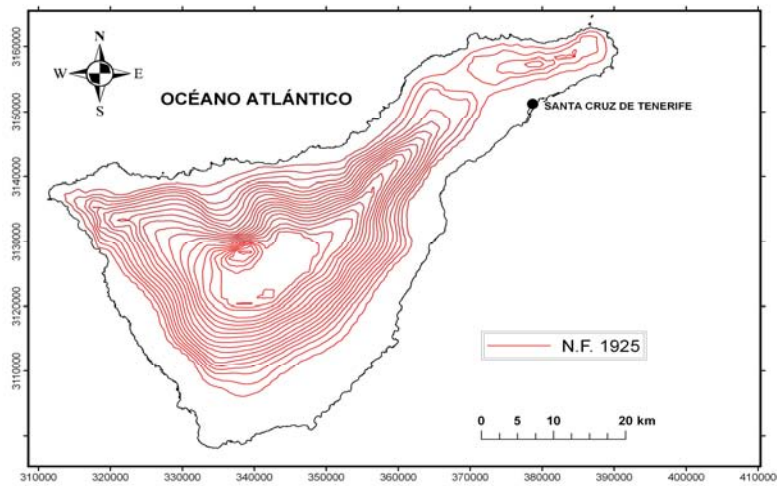


Figura 1.23. Mapa de isopiezas de Tenerife en el año 1925 (rojo) cada 100 m, donde se puede apreciar que se asemeja razonablemente bien a la topografía insular. Fuente: CIATFE. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

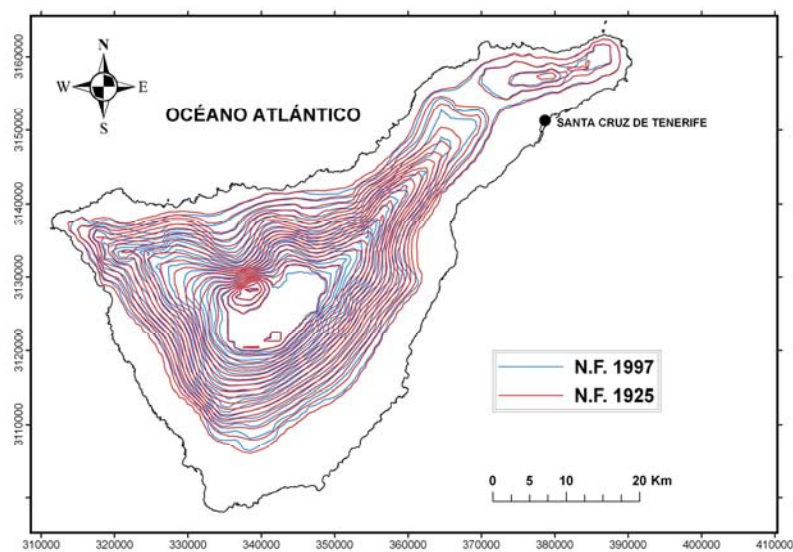


Figura 1.24. Mapa de isopiezas de Tenerife en el año 1925 (rojo) y en el 1997 (azul) cada 100 m, donde se puede apreciar el descenso generalizado del nivel freático. Fuente: CIATFE. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

Como resumen de las características hidrológicas de Tenerife se puede transcribir la descripción realizada por Custodio (1986) para el Congreso "CanAgua" celebrado en Las Palmas de Gran Canaria en noviembre de 1986: "Tenerife: altura suficiente para producir un notable efecto orográfico en la precipitación, con notable variación climática espacial, y vegetación de densidad moderada y a veces notable. Escasa escorrentía superficial por la continuidad de materiales volcánicos recientes de recubrimiento. Importante recarga de aguas subterráneas en zonas de medianías y altas. Escasos y poco importantes manantiales en estado natural, sin dar origen a cursos de agua de importancia, y en todo caso con fácil infiltración aguas abajo, hoy mayoritariamente desaparecidos a causa de la intensiva explotación del agua subterránea, principalmente mediante galerías. Uso continuado de reservas, con abatimientos freáticos de hasta 10 m/año, y acumulados que pueden superar 300 m, lo cual hace peligrar la futura operatividad del actual sistema de galerías, en especial de las de mayor altura. Posibles fugas de agua dulce al mar importantes. Escasos problemas de intrusión marina. Excelente calidad del agua de recarga y rápida renovación, y por el contrario, deficiente calidad de las aguas más profundas, dentro del núcleo volcánico, con abundancia de aguas bicarbonatadas sódicas y de temperatura relativamente alta. Zonas periféricas con apreciable contaminación de origen agrícola."

1.6.1. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS

Atendiendo a las características hidrogeológicas generales de los materiales que forman el subsuelo de Tenerife, Navarro (1995) los agrupó en dos grandes formaciones: Miocénicas y Post-Miocénicas (Figura 1.25).

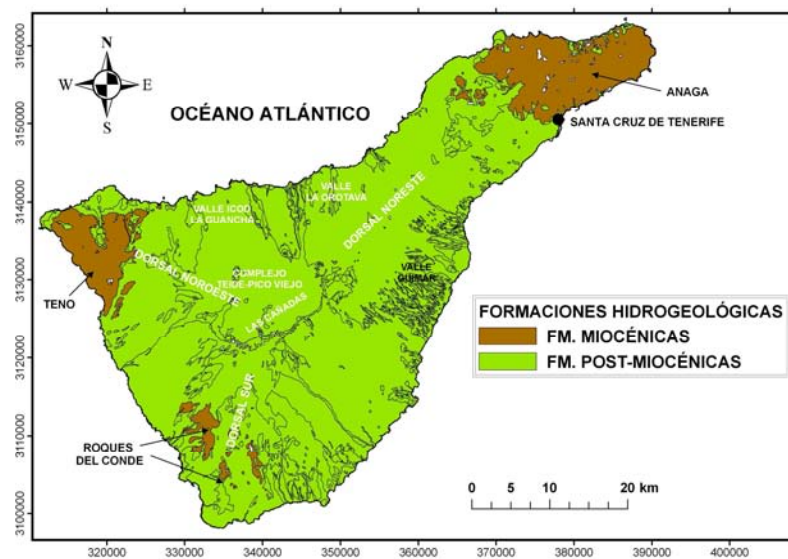


Figura 1.25. Mapa de los afloramientos en superficie de las formaciones hidrogeológicas Miocénicas y Post-Miocénicas de Tenerife. [www.grafcan.es]. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

- **Formaciones Miocénicas** (entre los 12 y los 5 Ma): corresponden a la unidad más antigua de la Serie Basáltica (llamada Serie Basáltica I) anteriormente descrita. Afloran en los tres macizos basálticos de la isla: Teno, Anaga y Roques del Conde (Figura 1.25). La forman un apilamiento subhorizontal de coladas y piroclastos de composición basáltica, que han sufrido intensos procesos de alteración y compactación con el paso del tiempo, comportándose desde el punto de vista hidrogeológico como un zócalo de muy baja permeabilidad. Están cortadas generalmente por una densa red de diques (Figura 1.3.) a la que se asocia una ligera fracturación secundaria, en la cual se acumulan pequeños volúmenes de aguas subterráneas que se transportan con mucha dificultad comportándose a modo de acuitardo o acuicludo.

- **Formaciones Post-Miocénicas** (desde los 3,5 Ma hasta la actualidad): son la unidad más moderna de la Serie Basáltica (Serie Basáltica II), la Serie Cañadas (Edificio Cañadas) y los materiales que forman la Serie Moderna (CTPV y los Sistemas Dorsales), y afloran en toda la isla excepto en los tres macizos basálticos (Figura 1.25). La primera de ellas es la más extensa y potente de las Formaciones Post-Miocénicas, y la forman un apilamiento de lavas basálticas con escasas intercalaciones de depósitos piroclastos, también basálticos, que posee un espesor de 600 a 800 metros. Al igual que la Serie Basáltica I, la Serie Basáltica II está intruida por una red de diques basálticos que disminuye su densidad desde el eje de las dorsales hacia los flancos. Aunque en comparación con la Serie Basáltica I, la Serie Basáltica II conserva buena parte de la alteración primaria, su comportamiento hidrogeológico es muy heterogéneo a nivel insular, aunque se observa una tendencia a la disminución de la permeabilidad con la profundidad.

La Serie Cañadas forma el Edificio Cañadas anteriormente descrito, formado por potentes coladas y piroclastos pumíticos de carácter intermedio con algunas intercalaciones de materiales basálticos y traquibasálticos. Desde el punto de vista hidrogeológico se considera como una unidad de escasa permeabilidad.

La Serie Moderna incluye todas las emisiones del CTPV y los Sistemas Dorsales. Son rocas volcánicas de todas las composiciones, predominando basaltos y traquibasaltos, y con importantes capas de materiales fonolíticos. Corresponden al último periodo de actividad volcánica de la isla y debido a la porosidad primaria de sus materiales y a que prácticamente no han experimentado compactación y/o alteración, se consideran como un conjunto muy permeable y con una elevada porosidad drenable (hasta un 30 %, según el PHI, 1996).

Esta subdivisión hidrogeológica entre Formaciones Miocénicas y Post-Miocénicas realizada por Navarro (1995) y adoptada por el PHI (1996), coincide a grandes rasgos con la realizada por Custodio (1988) donde diferenciaba entre un núcleo de baja permeabilidad de materiales antiguos, en el que el agua es de tipo Na-HCO₃ con una alta mineralización dado su prolongado tiempo de residencia, y una capa más superficial de materiales más jóvenes y permeables, con aguas de relativamente corto tiempo de residencia y un menor contenido en sales disueltas. En las zonas donde el espesor de materiales jóvenes y permeables es delgado, como en los macizos basálticos antiguos de Teno y Anaga, las aguas altamente mineralizadas se

encuentran muy próximas a la superficie freática. Por el contrario, en los valles de deslizamiento como La Orotava, Güimar o de Icod-La Guancha, donde existe un considerable espesor de materiales jóvenes y permeables, las aguas más salinas se encuentran a una profundidad mucho mayor.

1.6.2. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES VOLCÁNICOS

El comportamiento hidrogeológico de los materiales, que constituyen los terrenos volcánicos como los de la isla de Tenerife, es extremadamente variable tanto a microescala como a macroescala. Sin embargo existen factores comunes que condicionan el funcionamiento en ambas escalas de observación, que han sido descritos en diferentes estudios (Custodio, 1985; Navarro, 1995; PHI, 1996) y que es importante destacar:

1. Porosidad y permeabilidad inicial: normalmente los materiales volcánicos tiene una porosidad y permeabilidad inicial muy alta, pero son fácilmente alterables, disminuyendo drásticamente su permeabilidad con el tiempo y/o tras sufrir procesos de carácter térmico, hidrotermal o hídrico. Finalmente con el paso del tiempo se genera una formación de baja permeabilidad que conserva una porosidad total y drenable relativamente alta en comparación con otras rocas consolidadas (Custodio, 1986).

2. Composición original de las rocas: en Tenerife, como consecuencia de la existencia de una gran variedad en la composición original de las rocas (i.e. Brändle y Bellido, 2000), se puede observar una diversidad enorme en las características hidrogeológicas de los materiales (ver Tabla 1.1). Sin embargo, en general y desde un punto de vista cualitativo, las lavas basálticas y los depósitos piroclásticos tienen una permeabilidad inicial superior a las lavas y diques fonolíticos (Navarro, 1995). La permeabilidad vertical de los materiales a su vez es de 20 a 100 veces menor que la permeabilidad horizontal. Además, cuando el flujo de agua subterránea circula por redes de diques y fracturas orientados paralelamente a las líneas de flujo, la permeabilidad horizontal puede incluso aumentar en 1 ó 2 órdenes de magnitud (Custodio, 1985).

Tabla 1.1. Permeabilidad de los materiales volcánicos de la isla de Tenerife (Custodio, 1985).

FORMACIÓN	PERMEABILIDAD SATURADA ($m \cdot d^{-1}$)
Escudo Basáltico	< 0,001
Series Basálticas alterados hidrotermalmente	0,05 - 0,005
Series Basálticas antiguos no alterados	0,1 - 1,0
Conglomerados Volcánicos	< 0,002 - 0,45
Fonolitas	0,06 - 0,09
Ignimbritas traquíticas	0,01
Basaltos modernos	0,75 - 2,0
Basaltos recientes	50 - > 1000

3. Factor tiempo: aquellos materiales que son más recientes suelen tener una permeabilidad inicial mayor que la que pueden tener materiales antiguos. Esto se debe a que con el paso del tiempo, los materiales van sufriendo diferentes grados de alteración y

compactación, en función de la sensibilidad o resistencia de los materiales a cada uno de estos factores. La alteración hidrotermal transforma en arcillas los materiales preexistentes y deposita en poros y fisuras los productos resultantes y otros minerales secundarios (Navarro, 1995). La compactación, por su parte, tiende a apelmazar todos aquellos materiales que tienen poca resistencia mecánica, especialmente si ya han sido debilitados previamente por la alteración hidrotermal. El resultado de estos dos procesos es una disminución de la porosidad de los materiales con el tiempo, favoreciendo las pérdidas de permeabilidad y de porosidad drenable de los mismos.

4. Fracturación secundaria: la fracturación secundaria frecuentemente inducida por la intrusión de diques, puede modificar el comportamiento hidrogeológico del sistema, incrementando la permeabilidad de un material que a priori debería ser reducida. La fracturación puede afectar a todo tipo de materiales, pero el cambio hidrogeológico está condicionado por la fragilidad de los materiales. En las lavas y diques, que son más frágiles, el cambio será muy acusado, pero en materiales más dúctiles como los almagres las fracturas vuelven a cerrarse por deformación plástica de la roca encajante.

5. Ambiente volcano-estructural: en general los tres factores anteriormente nombrados son los que condicionan las características hidrogeológicas de los materiales volcánicos. Sin embargo, desde un punto de vista más amplio, el ambiente volcano-estructural en el que estén esos materiales es el que al final controlará el funcionamiento del acuífero. En Tenerife se puede hablar de al menos tres ambientes volcano-estructurales claramente diferenciados:

A. Macizos basálticos (Figura 1.26A): en estos ambientes, que suelen estar constituidos por los materiales más antiguos de Tenerife (Series Basálticas), la permeabilidad ya de por sí reducida, disminuye con la profundidad.

B. Zonas de dorsales o rift (Figura 1.26B): en general este ambiente está caracterizado por una fuerte intrusión de diques que inducen una fracturación secundaria importante, aumentando la porosidad drenable y una alta permeabilidad vertical. Dentro de este ambiente volcano-estructural se pueden identificar dos zonas: el núcleo, donde las características antes mencionadas son más patentes y en el que el flujo paralelo a la fracturación o longitudinal predomina sobre el flujo transversal, y los márgenes, donde la intrusión de diques y la fracturación y microfracturación asociada es mucho menor.

C. Valles y depresiones (Figura 1.26C): normalmente los valles y depresiones suelen estar rellenos de materiales más jóvenes y de mayor permeabilidad que la base, que puede estar formada por el "mortalón" u otro material prácticamente impermeable. En la cabecera de estos ambientes suelen existir diques paralelos a la misma que dificultan el flujo de agua subterránea en sentido cumbre-mar. Como se verá en el siguiente apartado, el comportamiento hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas del Teide, en teoría, se ajusta bastante bien a este ambiente volcano-estructural.

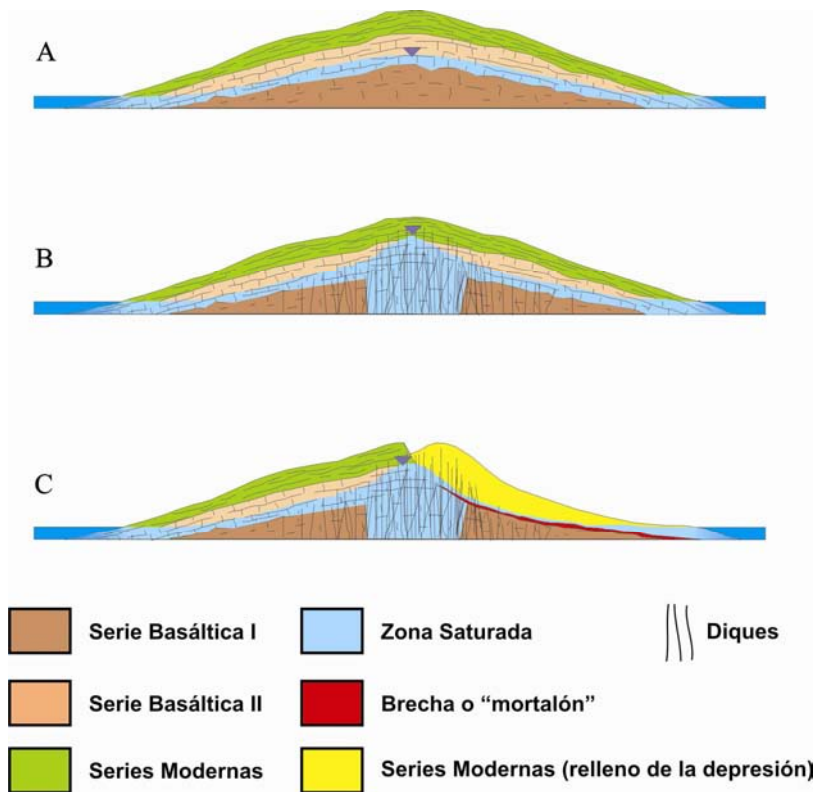


Figura 1.26. Cortes hidrogeológicos ideales de tres ambientes volcano-estructurales presentes en Tenerife (modificado de Navarro y Farrujia, 1989). Ver explicación en el texto. En B y C se puede advertir la sobreelevación del nivel freático en el núcleo de la dorsal debido a que es la zona de mayor intrusión de diques.

A gran escala hay variaciones verticales de permeabilidad, debido a la sucesión de depósitos y coladas de procesos eruptivos diferentes que dan lugar a un modelo en capas superpuestas, de manera que la permeabilidad disminuye con el aumento de la profundidad como norma general. Las variaciones horizontales de este parámetro son más acusadas que en la vertical, sobre todo en el ámbito de las zonas de dorsales o rifts, a causa de la presencia de diques y fracturas secundarias.

1.7. ÁREA DE ESTUDIO: EL ACUÍFERO DE LAS CAÑADAS DEL TEIDE

El acuífero de Las Cañadas del Teide coincide, atendiendo a la zonificación hidrogeológica planteada en el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHI, 1996), con la Zona III, que a su vez comprende a las subzonas III.0.1, III.0.2 y III.0.3 (Figura 1.22), esto es, la depresión de Las Cañadas, en cuyo interior se encuentra el CTPV, y el Valle de Icod-La Guancha. A su vez, el acuífero de Las Cañadas estaría entre los siguientes límites volcano-estructurales: el Macizo de Tigaiga por el Este, los Acantilados de La Culata y la Dorsal Noroeste por el Oeste y la pared de Las Cañadas por el Sur (Figura 1.27). Tal y como se ha comentado anteriormente, en la Caldera de Las Cañadas se observan principalmente los depósitos del volcanismo central

de la isla, tanto del Edificio Cañadas como del CTPV. La Zona III, donde se encuentra el acuífero de Las Cañadas del Teide, posee un área de 216 km² y altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 3718 m.s.n.m. en el pico del Teide. Aunque dicho acuífero ha sido el último en ser perforado, está considerado como la mayor reserva hídrica de la isla (PHI, 1996) y es por eso que en la actualidad es una de las pocas zonas en las que las galerías se siguen reperforando (Farrujia, I., comunicación personal). Este acuífero está siendo explotado por varias decenas de galerías, de las cuales la galería Barranco de Vergara (en rojo en la Figura 1.27), ubicada en el sector III.0.2, es la de mayor caudal de la isla, con un caudal total cercano a los 300 L·s⁻¹.

1.7.1. CLIMA

El acuífero de Las Cañadas presenta diferencias climáticas muy notables ya que abarca zonas desde el nivel del mar hasta casi los 4000 metros de altitud. Mientras el clima del Valle de Icod-La Guancha está fuertemente condicionado por los vientos húmedos del noreste o alisios, tanto la Caldera de Las Cañadas como el complejo volcánico Teide-Pico Viejo se sitúan por encima de los 1800 m.s.n.m. y por tanto muy por encima de la altura típica a la que se sitúa la inversión térmica y el mar de nubes. Como consecuencia de esta situación, el clima de la Caldera de Las Cañadas es extraordinariamente seco durante cerca del 90 % de los días del año. En Las Cañadas llueve poco y el régimen pluviométrico es muy irregular, concentrándose casi toda la precipitación en tan sólo 43 días de media anual, de los cuales 12 días de media anual son en forma de nieve. Las nevadas pueden ocurrir de octubre a mayo, aunque de diciembre a abril es cuando la probabilidad es mayor. La precipitación anual media en Las Cañadas oscila entre los 500 mm en las zonas de barlovento y menos de 300 mm en el interior de la caldera (Figura 1.4.), concentrándose en los meses de octubre a abril. Sin embargo, los valores medios ocultan la frecuencia de periodos muy lluviosos (más de 1000 mm) con otros años extremadamente secos (menos de 100 mm) (Villalba, 2008). Respecto a las temperaturas, la Caldera de Las Cañadas presenta una temperatura media anual de unos 10°C, siendo en los meses más fríos enero y febrero con una temperatura media inferior a los 5°C y los más calurosos julio y agosto con unos 18°C de media (PHI, 1996).

1.7.2. GEOLOGÍA

Desde un punto de vista geológico, el medio poroso del acuífero de Las Cañadas está formado principalmente por el Edificio Cañadas y por el CTPV. El Edificio Cañadas aflora a lo largo de toda la pared de la caldera (Figuras 1.9.y 1.10) y en el Macizo de Tigaiga, pero además ocupa el basamento del Valle de Icod-La Guancha y también posiblemente el Las Cañadas. La Caldera de Las Cañadas y el Valle de Icod-La Guancha a su vez se han rellenado por una sucesión de capas de coladas lávicas poco alteradas y depósitos de caída, procedentes todos del CTPV. Estos materiales de relleno son de una gran diversidad química ya que, como se

ha dicho anteriormente, van desde basaltos hasta fonolitas, englobando una amplia gama de composiciones intermedias (i.e. Ancochea et al, 1999; Martí et al, 1994; Bryan et al., 1998; Cantagrel et al, 1999; Ablay y Martí, 2000; Giordano et al, 2000). No obstante, los términos más evolucionados (fonolitas y traquitas, principalmente) se encuentran limitados a las capas más superficiales mientras que los términos máficos (basaltos y basanitas, principalmente) conforman el mayor espesor del CTPV (Ablay y Martí, 2000). Estos materiales se depositaron sobre una formación de carácter fragmentario que constituye el depósito del deslizamiento, al que se denomina "mortalón" (Figura 1.13). Esta formación ha sido identificada en el frente de varias galerías del Valle de Icod-La Guancha y en la cabecera del Valle de la Orotava, pero en el interior de Las Cañadas no ha sido aún observada (ver capítulo 2 de la presente tesis).



Figura 1.27. Mapa geológico del área de estudio donde se ha representado los límites de la Zona III (línea negra discontinua). Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N. (GRAFSCAN).

Por otro lado, existe una red de diques que en superficie queda patente en las alineaciones de los centros eruptivos del interior de la caldera de Las Cañadas (Navarro, 1995; Ablay y Martí, 2000; Carracedo et al., 2007a) (Figura 1.28). Los diques en el interior de Las Cañadas presentan varios patrones de distribución: radiales asociados al CTPV (Navarro, 1995); concéntricos y cónicos relacionados con las diferentes posibles calderas de colapso del Edificio Cañadas (Martí y Gudmunsson, 2000); con direcciones NE-SO y NO-SE, asociados a las dorsales Noreste y Noroeste en el sector oriental y occidental de la caldera, respectivamente (Figura 1.28).

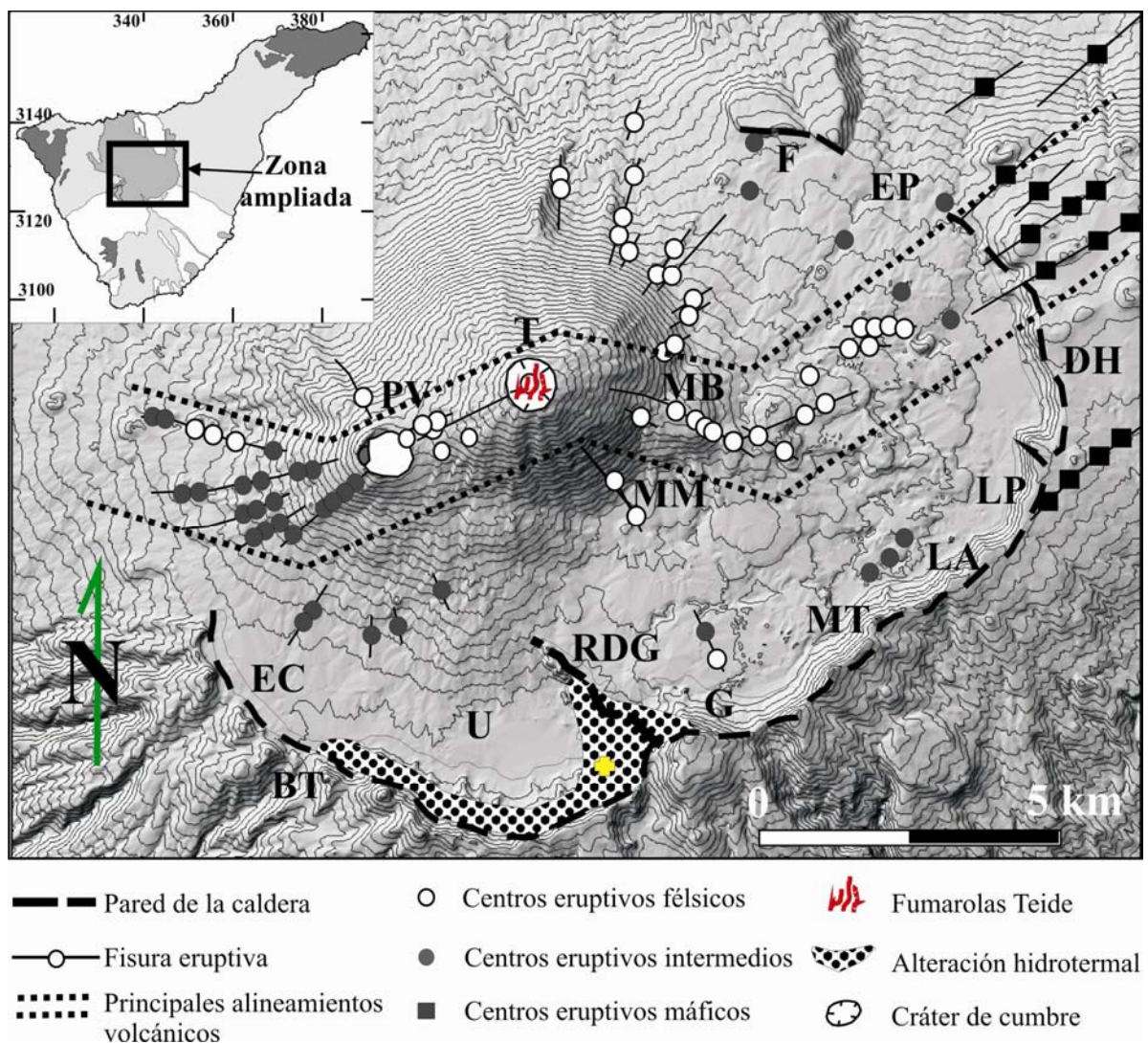


Figura 1.28. Principales características volcano-estructurales de la zona central de Tenerife (modificado de Ablay y Martí, 2000). EC: El Cedro; BT: Boca de Tauce; U: Llano de Ucanca; RDG: Roques de García; G: Guajara; MT: Montón de Trigo; LA: La Angostura; LP: Las Pilas; DH: Diego Hernández; EP: El Portillo; F: Fortaleza; MB: Montaña Blanca; MM: Montaña Majúa; T: Teide; PV: Pico Viejo. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

La distribución de los centros adventicios del CTPV puede dar una idea de las dimensiones de afección de la cámara magmática que lo alimentaba. Como se puede observar en la Figura 1.28, los centros eruptivos máficos están principalmente limitados a las zonas de dorsales, mientras que en el interior de Las Cañadas no se observan, excepto la erupción histórica de Chahorra (1798 d.C.) que no se ha representado en dicha figura pero que como se ha comentado anteriormente posiblemente pertenece al dominio de la Dorsal Noroeste. Sin embargo, los centros eruptivos intermedios y félsicos están distribuidos concéntricamente alrededor del CTPV, de tal manera que el "anillo exterior" lo forman principalmente los de carácter intermedio, mientras los félsicos conforman el "anillo interior" y más próximo al CTPV. Esta distribución ha sido interpretada por diversos autores como consecuencia de una mayor o menor interacción entre la cámara magmática somera del CTPV y los magmas máficos primarios procedentes del límite corteza-manto bajo la isla (Ablay y Martí, 2000).

Finalmente es importante destacar que en la Caldera de Las Cañadas existen ejemplos claros que evidencian que ha habido y que posiblemente aún hay fenómenos de hidrotermalismo (Pous et al., 2002). Un buen ejemplo de ello lo representan las fonolitas alteradas hidrotermalmente y de coloración verde-rojiza que afloran cerca del borde sur de Las Cañadas en la zona de los Roques de García y que se conocen como "Los Azulejos" (Figura 1.29). Estas fonolitas pertenecientes al Edificio Cañadas presentan óxidos de Fe, ceolitas, illitas y esmectitas (Bustillo, 1989). Estos depósitos parecen seguir una alineación paralela al borde sur de la caldera de Las Cañadas, relacionada con el "Graben de Los Azulejos" descrito anteriormente (Ancochea et al., 1990; Martí et al., 1994; Edgar et al., 2005; Galindo et al., 2005), indicando que posiblemente fue una zona de circulación preferente de fluidos calientes que alteraron hidrotermalmente la roca encajante (Bustillo, 1989; Galindo et al., 2005), al igual que se observa en las rocas próximas a los bordes de la Caldera de Tejedá en Gran Canaria (Muñoz, 2005; Cabrera, 2006). La existencia de esta zona preferencial de circulación de fluidos también ha sido puesta en evidencia a partir de los estudios de emisión difusa de gases a través de los suelos de Las Cañadas, donde se ha observado una mayor concentración de gas helio y gas radón en estas áreas (Hernández et al., 2000; Hernández et al., 2004a, 2004b).



Figura 1.29. Detalle del afloramiento de "Los Azulejos", que es un buen ejemplo de fenómenos de alteración hidrotermal residual en el ámbito de Las Cañadas. Localización de la foto: cruz amarilla en la Figura 1.28.

Además del hidrotermalismo asociado a la pared de Las Cañadas (Pous et al., 2002), se ha detectado una circulación de fluidos relativamente somera bajo el CTPV, y especialmente bajo Montaña Blanca (Aubert y Kieffer, 1998), posiblemente asociada a una cámara magmática poco profunda. Las recientes erupciones de magmas diferenciados de los centros adventicios del CTPV (Carracedo et al., 2007a), resaltando especialmente la erupción de Montaña Blanca hace aproximadamente 2000 años (Ablay et al., 1995), apoyan esta hipótesis. Además, la importante emisión de gases como el dióxido de carbono, el helio y otros volátiles en el cono de cumbre del Teide, unido a la existencia de abundantes fumarolas en el mismo, reafirma esta idea (Albert-Beltran et al., 1989, 1990; Pérez et al., 1992a, 1992b, 1994, 1996, 1999; Hernández et al., 2000; Hernández et al., 2004a, 2004b).

1.7.3. HIDROGEOLOGÍA

Desde el punto de vista hidrogeológico, el medio poroso del acuífero de Las Cañadas del Teide está representado por materiales de la Formación Post-Miocénica, dentro de la cual se pueden observar dos series, la Serie Pre-Cañadas que corresponde con el Edificio Cañadas, y la Serie Post-Cañadas o de relleno de la misma, que está representada en esta zona por el Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV). El comportamiento hidrogeológico de estas dos series es claramente diferente ya que la edad y el grado de compactación y alteración también lo es. Mientras los materiales de la Serie Cañadas han sido caracterizados como de permeabilidad reducida, al menos en el contacto con la zona saturada del acuífero de Las Cañadas (Navarro, 1995), los de la Serie Moderna presentan una permeabilidad relativamente elevada (Farrujia et al., 2004). Como se ha comentado anteriormente, las galerías del Valle de Icod-La Guancha

penetran desde los materiales de relleno del CTPV hasta alcanzar el zócalo impermeable o "mortalón" (Figura 1.13). Éste depósito, que se comporta de modo plástico, dificulta las labores de perforación de las galerías, pudiéndose considerar prácticamente impermeable desde el punto de vista hidrogeológico (Navarro y Farrujia, 1989; Navarro y Coello, 1989).

La elevada porosidad y permeabilidad primaria de los materiales de la Serie Post-Cañadas, unido a una topografía casi plana en el área de Las Cañadas y a la inexistencia de grandes capas horizontales impermeables, favorece la rápida recarga y acumulación de elevados volúmenes de reserva de agua en esta zona (Farrujia et al., 2004). Además, como se apuntaba antes, en el caso de que exista un sistema volcánico-hidrotermal somero bajo el CTPV, los procesos de arcillificación y la deposición de minerales secundarios en poros y fisuras (ambos relacionados con la alteración hidrotermal) unidos a la continua intrusión de diques bajo el mismo, harían que éste fuera prácticamente impermeable desde el punto de vista hidrogeológico (Navarro, 1995). Por tanto, *a priori* el zócalo impermeable en el acuífero de Las Cañadas estaría compuesto por el contacto entre materiales Pre- y Post-Cañadas, por el "mortalón" en las zonas donde esté presente y por el núcleo de alteración hidrotermal bajo el CTPV.

1.8. INVESTIGACIONES PREVIAS

El conocimiento sobre los recursos hídricos subterráneos en Tenerife, y especialmente del acuífero de Las Cañadas del Teide, se ha ido ampliando y mejorando gracias a una serie de estudios científicos que se han llevado a cabo en el marco de diferentes proyectos con objetivos muy diversos: caracterización geoquímica e isotópica de las aguas subterráneas, estudios del sistema volcánico-hidrotermal de la isla y de las fumarolas del Teide, prospecciones geotérmicas, modelos hidrológicos de superficie y subterráneos, etc.

A continuación se resumen las principales investigaciones previas de interés para el presente estudio:

1.8.1. PROYECTO SPA-15

Los primeros estudios hidrogeológicos rigurosos llevados a cabo en Tenerife se enmarcan dentro del proyecto "Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)" conocido como SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975), en el que predominó un estudio hidrológico del sistema sin prestar mucha atención a la geología local. En este estudio, que también se llevó a cabo en otras islas del Archipiélago Canario, se realizó el primer inventario de los puntos de agua así como una caracterización regional de la calidad de sus acuíferos. Una de las principales conclusiones fue detectar la existencia de una gran variedad hidroquímica a nivel insular, influenciada por la amplia gama de composición de los materiales que la constituyen así como por la heterogeneidad y anisotropía de los terrenos volcánicos, sin

olvidar el decisivo papel que juega la existencia de importantes zonas con aportes de gases endógenos que afectan a la composición final del agua subterránea. También se destacó la necesidad de un control riguroso de la explotación de los diferentes acuíferos para asegurar la creciente demanda del recurso, que debido a su explotación ha producido la disminución de las reservas tanto en cantidad como en calidad.

Una de las acciones más interesantes que se realizaron dentro del proyecto SPA-15 en el acuífero de Las Cañadas del Teide fue la perforación de 4 sondeos exploratorios en el interior de la Caldera de Las Cañadas. Estos sondeos aportaron una valiosa información sobre la historia eruptiva del CTPV y sobre la posición del teórico zócalo impermeable en el interior de Las Cañadas (Ablay y Martí, 2000) (Figura 1.30). Desgraciadamente, en la actualidad todos esos sondeos se encuentran parcialmente destruidos e inutilizables (J.J. Coello, comunicación personal).

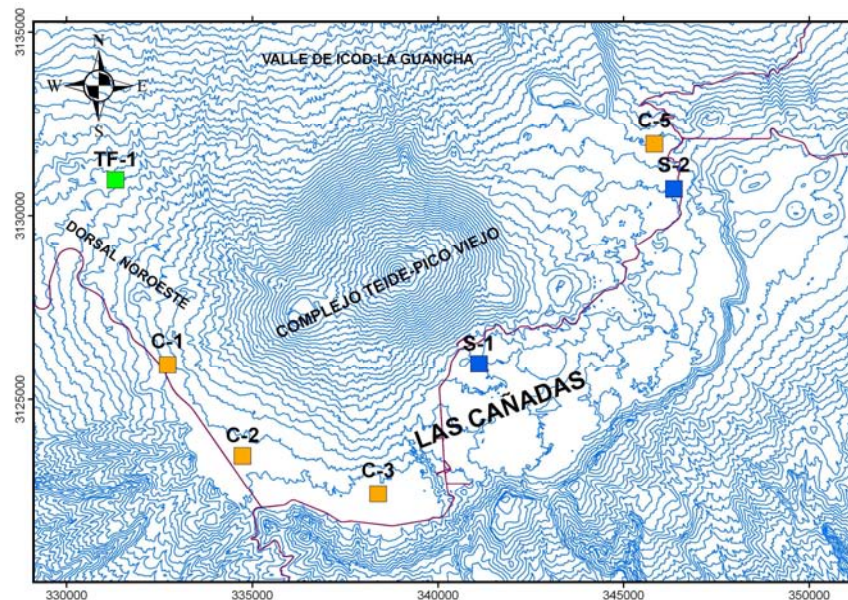


Figura 1.30. Ubicación de los sondeos realizados por el Ministerio de Obras Públicas (MOPU) y la UNESCO para el proyecto SPA-15 (cuadrados naranjas), los realizados por el CIATFE (cuadrados azules) y el sondeo profundo TF-1 con fines geotérmicos realizado en el año 1992 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1993) (cuadrado verde). Curvas de nivel (cada 50 m) y carretera principal en azul y malva, respectivamente. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

En los siguientes años, utilizando en parte los resultados y la experiencia adquirida en el proyecto SPA-15, se publicaron varios estudios científicos. El primero de ellos fue publicado por Coello (1973) donde se muestran los resultados de su trabajo de Tesis Doctoral sobre el subsuelo de Tenerife, realizado tras la observación del interior de más de 100 galerías. En éste interesante trabajo se menciona la existencia de una brecha volcánica conocida por los trabajadores de las galerías como "mortalón" y que representa la base de los deslizamientos laterales que formaron los Valles de La Orotava, Güimar y Las Cañadas-Icod-La Guancha. Por último, también se realizó el primer modelo de flujo de agua subterránea de Tenerife, aunque con resultados poco satisfactorios debido a la excesiva sencillez del modelo conceptual de partida y al escaso conocimiento de la estructura hidrogeológica de la isla (INTECSA, 1980a; INTECSA, 1980b; López et al., 1981). Este primer modelo, que fue realizado para el proyecto

MAC-21, no obtuvo resultados que permitieran simular la evolución del sistema, principalmente porque no se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: la anisotropía horizontal de los ejes estructurales o dorsales, la capacidad de almacenamiento de agua en las zonas profundas de dichos ejes, la distribución de la infiltración y recarga de riegos, la estimación de la superficie freática inicial y su evolución (1925-1975), el efecto de las extracciones durante ese periodo, la posición del fondo impermeable o zócalo, y/o la distribución geométrica.

1.8.2. PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA

Durante la década de 1980 y principios de la de 1990 el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizó varios proyectos de prospección geotérmica en Canarias, siendo uno de los más completos el que se realizó en la Caldera de las Cañadas del Teide y para el cuál se hicieron estudios geofísicos de magnetotelúrica, estudios geovolcanológicos, estudios geoquímicos e isotópicos de los gases del sistema volcánico-hidrotermal del Teide, estudios termométricos de superficie y estudios hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas (IGME, 1983-1993 a, b, c, d, e y f). A partir de todos estos estudios, se seleccionó la zona más idónea para la perforación de un sondeo profundo de exploración geotérmica, cuya ejecución se llevó a cabo entre 1992 y 1993 (ver Figura 1.30 y Tabla 1.2), y donde se midió un gradiente geotérmico mucho más bajo de lo esperado, con valores medios de 4,8 °C/100 m y máximos de tan solo 9,4 °C/100 m (IGME, 1993).

Tabla 1.2. Resumen de las características del sondeo profundo de exploración geotérmica realizado por el IGME en la zona de la Dorsal Noroeste (ver ubicación en la Figura 1.30). Fuente: IGME (1993).

No.	Latitud UTM (m)	Longitud UTM (m)	Altitud (m.s.n.m)	Profundidad (m)	Altura nivel piezométrico*
TF-1	331309	3130967	1725	1060	1325

*Dato dudoso al finalizar la perforación (m.s.n.m.).

Al igual que sucedió con el proyecto SPA-15, gracias al proyecto de prospección geotérmica en Tenerife llevado a cabo por el IGME, una serie de interesantes estudios geoquímicos e isotópicos relacionados en parte con sus resultados fueron publicados (Custodio et al., 1987; Custodio, 1988; Albert-Beltrán et al., 1989, 1990; Valentin et al., 1989, 1990). Aunque en Gonfiantini (1973) se había descrito por primera vez la línea meteórica local de Tenerife ($\delta^2\text{H} = 6,57 \cdot \delta^{18}\text{O} + 6,75$), Custodio et al. (1987) obtuvieron con una mayor cantidad de datos una nueva línea meteórica bastante diferente de la anterior ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15$). En dicho estudio Custodio et al. (1987) también publicaron la edad de algunas aguas subterráneas -entre 3000 y 8000 años de antigüedad- y caracterizaron como de origen volcánico la mayor parte del CO_2 disuelto en las aguas subterráneas.

Por su parte, Custodio (1988) realizó varios perfiles hidrogeoquímicos en diferentes zonas de Tenerife para, a partir de los datos hidroquímicos, subdividir la isla en dos zonas: un

núcleo de baja permeabilidad donde el agua se mueve lentamente y posee un alto contenido en CO_2 disuelto, y una capa más superficial de materiales más jóvenes y permeables con aguas de relativamente corto tiempo de residencia y bajo contenido en sales disueltas.

Albert-Beltran et al. (1989, 1990) y Valentin et al. (1989, 1990) estudiaron el sistema volcánico-hidrotermal de Tenerife, el primero a partir del estudio de las fumarolas del Teide y el segundo utilizando las anomalías físico-químicas de las aguas subterráneas. En Albert-Beltran et al. (1989, 1990) se estimó que la temperatura y presión de la cámara magmática del Teide estaba a una temperatura de $430 \pm 50^\circ\text{C}$ y una presión de 400 ± 100 bares, respectivamente. En el estudio de Valentin et al. (1990) se caracterizaron varias zonas con anomalías físico-químicas en las aguas subterráneas (temperatura, SiO_2 , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , B y NH_4^+), observándose una estrecha correlación espacial con las áreas de volcanismo histórico (Figura 1.31). En la Figura 1.32, extraída de Valentin et al. (1990), las anomalías fueron representadas en la entrada o boca de las galerías. Sin embargo, si se tiene en cuenta que el agua subterránea normalmente se extrae del frente o zona más profunda de la galería, que éstas son de varios kilómetros de longitud y con distribución radial desde el centro de la isla, las anomalías deberían situarse según Valentin et al. (1990) sobre las teóricas fracturas principales de las erupciones históricas. De acuerdo con Valentin et al. (1990), las anomalías se alinean formando dos grupos, el primero en las laderas de la Dorsal Noreste, debajo de la erupción de los años 1704-1705 d.C. (Siete Fuentes, Fasnia y Arafo), y el segundo en la Dorsal Noroeste, debajo de los volcanes históricos del Chinyero (1909 d.C.) y Chahorra (1798 d.C.).

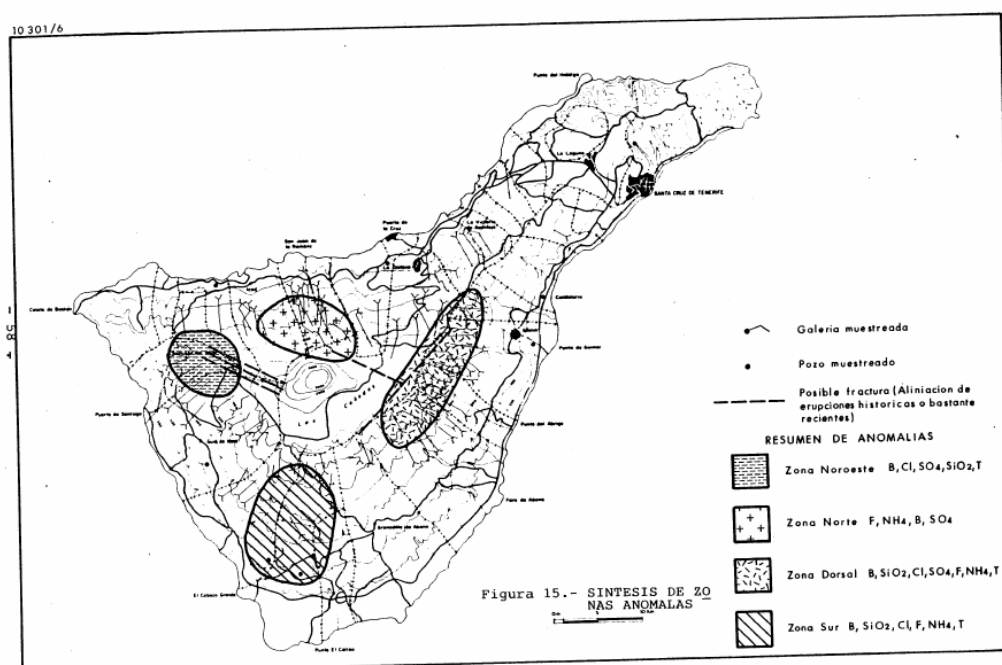


Figura 1.31. Síntesis de zonas anómalas en las aguas subterráneas según el estudio de exploración geotérmica llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España. Extraído de IGME (1983-1993e).

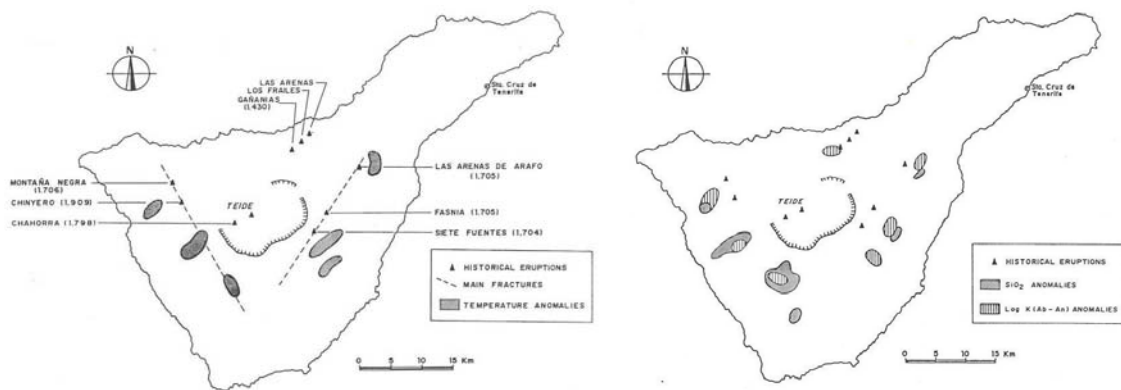


Figura 1.32. Izquierda: anomalías termales en las aguas subterráneas de Tenerife en relación con el volcanismo histórico; las áreas sombreadas indican temperaturas superiores a los 28°C. Derecha: anomalías de concentración de SiO_2 y de la temperatura de equilibrio, inferida a través del geotermómetro albita-anortita, en las aguas subterráneas de Tenerife. Extraído de Valentin et al., 1990.

1.8.3. PLAN HIDROLÓGICO INSULAR (PHI) Y MODELOS

A finales de los 80 y principios de los 90 el CIATFE desarrolló el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHI) con un mayor enfoque geológico que el de los estudios precedentes y en el que se describe la existencia de diferentes estructuras geológicas y de un zócalo de muy baja permeabilidad (PHI, 1996). Con toda la información hidrogeológica adquirida en la elaboración del PHI (Navarro y Farrujia, 1989) se definió la superficie freática inicial de Tenerife en el año 1925 (Figura 1.23), fecha límite a partir de la cual el sistema acuífero ya no estaba en equilibrio, debido sobre todo al aumento de la perforación de galerías y pozos y al consecuente incremento de las extracciones que empezaron a provocar descensos del nivel freático apreciables. En estos trabajos, también se definió la evolución del nivel freático insular hasta el año 1973 y luego hasta el año 1985 (Braojos, 1988).

Gracias también a esta nueva información se pudo realizar en el año 1991 un nuevo Modelo de Flujo Subterráneo (MFS) de Tenerife que sustituyera al de 1980 (INTECSA, 1980a; INTECSA, 1981b; López et al., 1981), con un tamaño de malla más pequeña que, además, fuera capaz de representar la anisotropía de la permeabilidad en los ejes estructurales de la isla, el flujo en las zonas profundas de los mismos, y la profundización progresiva de las galerías (Farrujia et al., 1992; López et al., 1992). La diferencia esencial de este modelo con el anterior era la representación de un nuevo modelo conceptual del subsuelo insular, fundamentado en la existencia de diferentes estructuras geológicas (disposición en capas, ejes estructurales y grandes depresiones) y de un zócalo de muy baja permeabilidad. Este nuevo modelo de flujo permitió comprobar las nuevas hipótesis de funcionamiento hidrogeológico y también sirvió como instrumento de pronóstico de funcionamiento del acuífero ante futuras situaciones de explotación del acuífero insular (Farrujia et al., 1992; López et al., 1992).

Con los datos climáticos y edafológicos recopilados por el CIATFE en los años siguientes al PHI (PHI, 1996), se desarrolló un Modelo de Hidrología Superficial (MHS) de la isla de Tenerife con el que se llevó a cabo una nueva evaluación de la recarga (Braojos, 1997;

Braojos et al., 2007). Esta nueva información, unida a un mejor conocimiento de la estructura hidrogeológica de la isla, justificó en el año 2002 la revisión y actualización del MFS de Tenerife del año 1991 (Farrujia et al., 1992; López et al., 1992). En este nuevo modelo de flujo subterráneo (SURGE, 2002) se incluyó una mejor caracterización (posición y extensión) del zócalo impermeable, así como la superficie freática del año 1997 y las extracciones por galerías y pozos del periodo 1985-1997.

1.8.4. SONDEOS DE INVESTIGACIÓN O RECONOCIMIENTOS

Desde que se realizó el Avance del Plan Hidrológico Insular de Tenerife (Navarro y Farrujia, 1989) el CIATFE evidenció la escasez de información del acuífero de Las Cañadas del Teide, que se había denominado como la reserva hídrica más importante de Tenerife. Por tanto, la necesidad de obtener más y mejor información del acuífero de Las Cañadas llevó al Cabildo de Tenerife, con la financiación del Gobierno de Canarias, a perforar entre 1992 y 1995 dos sondeos de reconocimiento en el interior de la Caldera de Las Cañadas (Figura 1.30). El primero de ellos denominado S-1 ó "Montaña Majúa" está localizado en el centro de Las Cañadas a 2264 m.s.n.m., tiene una profundidad total de 505 m y alcanzó el nivel freático a los 1819 m.s.n.m.. El segundo de ellos llamado S-2 ó "El Portillo" se perforó a 7 km del anterior, a 2133 m.s.n.m. en el sector oriental de Las Cañadas (Farrujia et al., 2001a). Este último, con 404 m de profundidad, también alcanzó en el año 1995 el nivel freático a 1780 m.s.n.m.. En el año 1999, el CIATFE instaló en el sondeo S-1 una Estación de Adquisición de Datos (EAD) en continuo, con la finalidad de poder realizar un control de la evolución temporal del nivel freático y de las características físico-químicas del acuífero de Las Cañadas (Farrujia et al., 2001b). Dicha EAD cuenta con diferentes sensores que miden pH, conductividad eléctrica y temperatura a tres profundidades diferentes dentro de la zona saturada del acuífero, así como la medida simultánea del nivel freático. Ambos sondeos han aportado información muy valiosa no sólo desde el punto de vista puramente hidrológico mediante el control de la evolución del nivel freático del acuífero de Las Cañadas (Farrujia et al., 2004), sino también para estudios de la actividad volcánica (Martin y Soler, 1997; Martin, 1999; Soler et al., 2004; Marrero et al., en prensa) e investigaciones relacionadas con el origen y evolución de Las Cañadas y del Complejo Teide-Pico Viejo (Ablay y Martí, 2000).

1.8.5. HIDROGEOQUÍMICAS

A partir del archivo de análisis químicos de las aguas elaborado para el PHI (1996) y de nuevos análisis de aguas, se realizaron varios estudios hidrogeológicos e hidroquímicos exhaustivos en el área de Las Cañadas del Teide (Chiodini, 1994; Navarro, 1995). En ellos se realizó una primera caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y se estudio su conexión hidráulica con las zonas adyacentes, especialmente con la

zona sur de la isla. Se llegó a la conclusión de que el agua de Las Cañadas fluía principalmente hacia el norte, a través del Valle de Icod-La Guancha, y en menor medida hacia la Dorsal Noroeste, Macizo de Tigaiga, el Valle de La Orotova y quizás hacia la zona de Fasnia (zona sureste de Tenerife), siendo sin embargo el flujo prácticamente nulo hacia la zona sur y occidental de la isla (desde Chasogo hasta los altos de Arico). En estos trabajos también se concluyó que la composición química del agua en la región costera de Tenerife está caracterizada principalmente por la interacción del agua con la roca volcánica y la infiltración marina. Sin embargo, en el caso de la región más elevada, como es la del área de Las Cañadas, la interacción agua-roca se da con distinto grado de intensidad en función de la cantidad de gases originados por el sistema volcánico, principalmente CO_2 , que se disuelven en el acuífero dando lugar a aguas subterráneas con altos contenidos en bicarbonatos (e incluso sulfatos y cloruros en algunas zonas) y una alta agresividad.

Uno de los aspectos más estudiados y al mismo tiempo más difícil de describir a lo largo de todos estos años, es la existencia de importantes anomalías de flúor en las aguas subterráneas, que ocurren en algunos sectores de la isla de Tenerife y principalmente en el acuífero de Las Cañadas del Teide. Varios autores han publicado diversos estudios tratando de establecer un modelo que explique el ciclo geoquímico del flúor y la distribución de las anomalías en las aguas subterráneas de Tenerife (Navarro y Braojos, 1984; Amigo et al., 1987; Chiodini, 1994; Farrujia et al., 1994; Casillas et al., 1995; Navarro, 1995). Las principales conclusiones indican que estas anomalías de flúor en las aguas subterráneas de algunas zonas de Tenerife pueden deberse a la interacción del agua subterránea con los materiales volcánicos sálicos que forman el medio poroso de algunas zonas de la isla, disolviéndose en mayor o menor medida flúor en función de la agresividad del agua por aporte de CO_2 profundo. El origen de estas anomalías por aporte de fluidos magmáticos de alta temperatura, los que pueden contener HF, que condensan directamente en el acuífero, ha sido prácticamente descartado (Casillas et al., 1995). Sin embargo, en muchos de ellos se asume que el contenido en flúor en las aguas subterráneas está fuertemente tamponado por los procesos de precipitación y disolución del calcio, principalmente en forma de calcita (Chiodini, 1994; Navarro, 1995).

1.8.6. ESTUDIOS GEOFÍSICOS

La Caldera de Las Cañadas ha sido objeto de numerosos estudios geofísicos sobre las propiedades electromagnéticas de los materiales que la forman y que han aportado una valiosa información, tanto sobre su estructura interna, directamente condicionada por el origen de la misma, como de la posible existencia de un núcleo de alteración hidrotermal bajo el Complejo Teide-Pico Viejo, e indirectamente sobre el control estructural del flujo de agua subterránea en su interior (Ortiz et al., 1987; Camacho et al., 1991; Aubert y Kieffer, 1996; Aubert y Kieffer, 1998; Ablay y Kearey, 2000; Araña et al., 2000; Pous et al., 2002; Coppo et al., 2008a, 2008b). Además, algunos de estos estudios han aportado datos importantes sobre la geometría de la zona saturada del acuífero en zonas del interior de Las Cañadas, donde no se

disponía de información alguna (Aubert y Kieffer, 1998; Pous et al., 2002; Coppo et al., 2008a, 2008b).

Ortiz et al. (1987) realizó el primer estudio de magnetotelúrica (MT) en Las Cañadas, postulando la existencia de, al menos, dos depresiones volcano-tectónicas en el interior de la caldera, rellenas posteriormente por los materiales jóvenes y poco alterados del Complejo Teide-Pico Viejo. Posteriormente, en el estudio de autopotencial (self-potential o SP) desarrollado por Aubert y Kieffer (1998) se postuló que la Caldera de Las Cañadas se ha formado al menos por dos fenómenos superpuestos: un colapso vertical en el sector central (Guajara) y un deslizamiento gravitacional en el sector oriental (Diego Hernández), sin especificar el origen del sector occidental (Ucanca). El estudio de magnetotelúrica y audiomagnetotelúrica de Pous et al. (2002), desarrollado en el interior de Las Cañadas, llega a conclusiones similares, infiriendo tres posibles calderas en el interior de Las Cañadas, cuyos bordes representarían límites hidrogeológicos más o menos impermeables para el movimiento del agua subterránea. Por su parte, en los estudios de audiomagnetotelúrica de Coppo et al. (2008a, 2008b) no sólo infieren la existencia de tres calderas de colapso en el interior de Las Cañadas sino que estiman el volumen y el área de cada una.

Los resultados de todos estos estudios geofísicos coinciden en parte con la hipótesis del origen de sucesivos colapsos verticales propuesta por diversos autores para la Caldera de Las Cañadas (i.e. Marti y Gudmundsson, 2000). No obstante, es importante destacar que estos estudios también coinciden en que la estructura interna inferida del sector oriental de Las Cañadas (zona de Diego Hernández) presenta un acusado buzamiento hacia el noreste, postulando que el flujo de agua subterránea en dicho sector se produce preferencialmente en ese sentido, es decir, hacia la zona de El Portillo y el Valle de La Orotova. Esta disposición del zócalo impermeable en la zona de Diego Hernández podría justificarse con la cabecera de un deslizamiento gravitacional como el de La Orotava. Sin embargo, la edad de dicho deslizamiento (0,3 Ma) lo hace claramente más antiguo que la formación de la caldera de Diego Hernández (0,2 Ma) (Pous et al., 2002).

Desde el punto de vista hidrogeológico, sin duda la principal contribución de estos estudios geofísicos es que poco a poco han ayudado a obtener una primera imagen aproximada de la geometría de la zona saturada del acuífero de Las Cañadas, que de otra forma sería muy difícil obtener debido a la ausencia casi total de información directa sobre la posición del zócalo impermeable o de la cota del nivel piezométrico en el interior de la caldera.

Finalmente, en el estudio de geofísica de Pous et al. (2002) se identificaron dentro del interior de Las Cañadas dos zonas anómalas con mínimos relativos de resistividad: una paralela y próxima a la pared de la caldera y otra de gran espesor que aparece bajo Montaña Blanca. La primera zona sugiere que el hidrotermalismo que dio lugar a la formación de "Los Azulejos" posiblemente aún esté latente en esta zona y, en menor medida, a lo largo del borde de la caldera. En la segunda zona, tal y como sugiere Pous et al. (2002), puede estar justificada con la presencia de un sistema volcánico-hidrotermal relativamente somero asociado a la cámara magmática del Complejo Teide-Pico Viejo. Los estudios de Ortiz et al. (1987), Aubert y

Kieffer (1998) y Coppo et al. (2008a) obtuvieron resultados similares al respecto, indicando la presencia de una importante circulación de fluidos hidrotermales en el sector oriental de Las Cañadas.

2.1. INTRODUCCIÓN

Para la correcta interpretación del funcionamiento hidrogeológico y de las propiedades hidrogeoquímicas de un acuífero es fundamental una buena caracterización del medio físico o poroso por el que circulan las aguas subterráneas. Esta importancia radica por un lado en la influencia que tiene sobre las características físico-químicas de las aguas subterráneas la naturaleza (composición, grado de compactación, alteración, etc.) de las rocas con las que está en contacto e interacciona, y por otro, en que el medio físico condiciona cómo y hacia dónde se va a producir el almacenamiento y flujo del agua subterránea una vez que se infiltra, favoreciendo unas zonas de flujos verticales y horizontales preferenciales respecto a otras (i.e. Violette et al., 1997).

Una de las primeras cuestiones a resolver a la hora de elaborar el modelo del medio físico o poroso del acuífero de Las Cañadas fue determinar cuáles son los límites hidrogeológicos del mismo. Según el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE), el acuífero de Las Cañadas del Teide se considera que coincide, como se ha comentado anteriormente, con la Zona III según la zonificación hidrogeológica de Tenerife (PHI, 1996). Por tanto, estaría limitado en superficie de la siguiente manera: hacia el Este por el Macizo de Tigaiga; hacia el Oeste por los Acantilados de La Culata y la Dorsal Noroeste; hacia el sur por la pared de Las Cañadas; y hacia el Norte por el mar (Figura 2.1.).



Figura 2.1. Imagen digital tridimensional de Tenerife orientada desde el norte hacia el sur, sobre la que se ha dibujado el límite de la Zona III, representado por una línea roja, así como los principales accidentes geográficos que la delimitan. Ver más explicación en el texto. CTPV: Complejo Teide-Pico Viejo. [www.earth.google.es/].

Si bien los límites superficiales del acuífero están relativamente bien definidos, la morfología de la superficie piezométrica y la configuración del basamento son las principales incógnitas del modelo físico, principalmente en el área de Las Cañadas.

Una de las cuestiones más importantes a resolver desde el punto de vista hidrogeológico es determinar cómo cambia la configuración del subsuelo de la misma en función de los dos modelos principales sobre el origen de la Caldera de Las Cañadas expuestos en el capítulo 1 (deslizamiento lateral frente a colapso vertical), ya que condiciona el *cómo* y *hacia dónde* se va a producir el flujo del agua subterránea en el acuífero de Las Cañadas. A continuación se presenta un breve resumen de las posibles implicaciones hidrogeológicas más importantes de ambos modelos:

1. Deslizamiento lateral: según este modelo, el zócalo del acuífero de Las Cañadas correspondería con el límite entre los materiales Pre- y Post-Cañadas, que está representado con el depósito observado en las galerías del Valle de Icod-La Guancha y denominado localmente como "mortalón" (i.e. Navarro y Coello, 1989). Este depósito se encontraría tanto en el interior de la Caldera de Las Cañadas como en el Valle de Icod-La Guancha y con un buzamiento claro hacia el norte siguiendo la morfología del deslizamiento lateral y favoreciendo así el flujo preferencial de las aguas subterráneas en ese sentido. Por tanto, el agua subterránea recargada en la Caldera de Las Cañadas fluiría siguiendo el buzamiento del "mortalón" hacia el mar principalmente a través del Valle de Icod-La Guancha, y tras rodear el Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) ya que en su interior posee un núcleo de alteración hidrotermal que representa una zona de baja permeabilidad (Navarro, 1995). Dichas aguas subterráneas se descargarían finalmente en el mar, salvo que sean interceptadas por diques orientados perpendicularmente al flujo y/o por las galerías y pozos excavados en la zona (ver Figuras 2.2. y 2.3.). La disposición del plano inclinado del "mortalón" en el interior de Las Cañadas y la relativamente baja permeabilidad de los materiales que conforman la pared de la Caldera de Las Cañadas, limitarían considerablemente el flujo de agua subterránea hacia la vertiente meridional de la isla (Navarro, 1995).

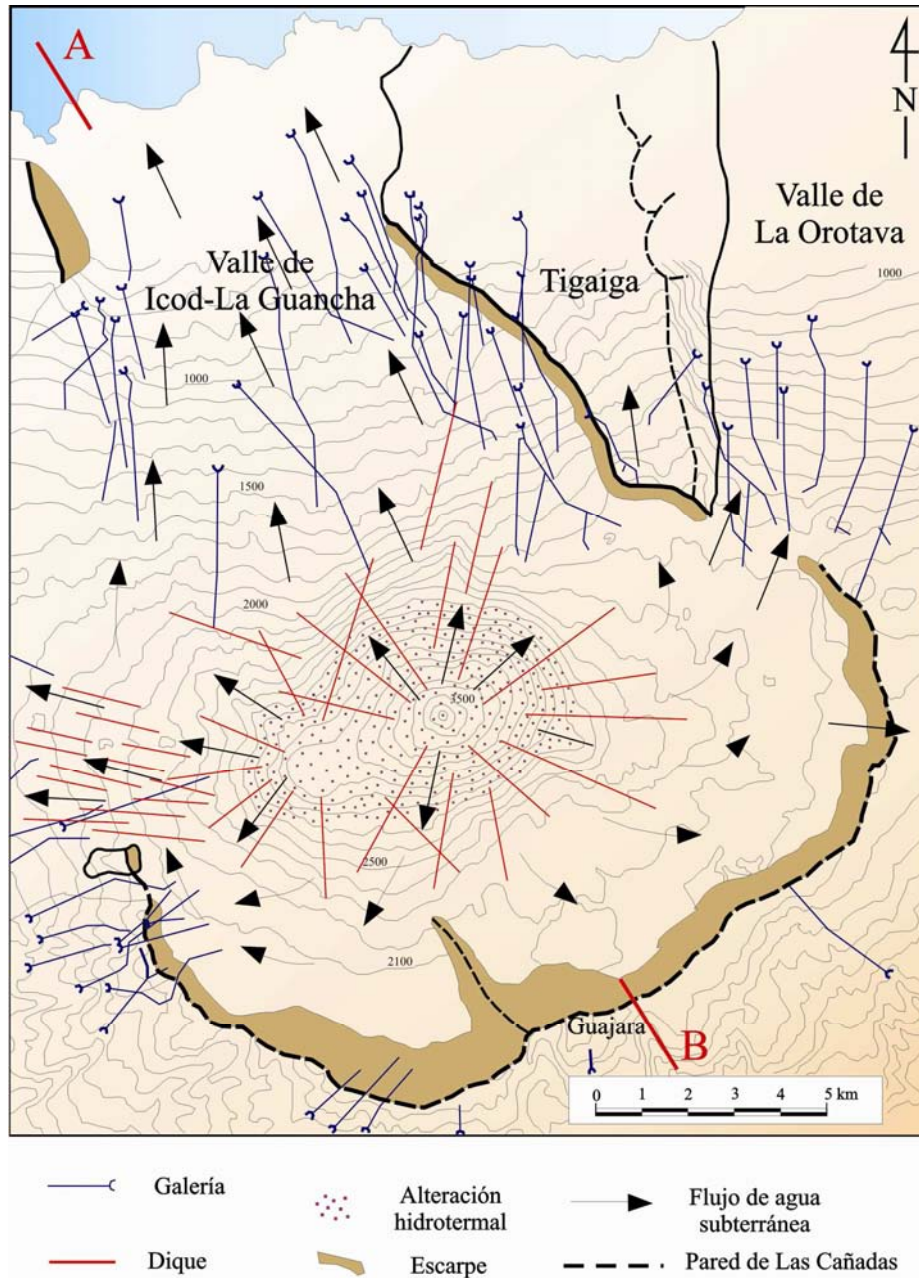


Figura 2.2. Modelo teórico del flujo de agua subterránea en el acuífero de Las Cañadas según la hipótesis de deslizamiento lateral (modificado de Navarro, 1995).

2. Colapso vertical: según este modelo, el zócalo en el interior de la Caldera de Las Cañadas también sería considerado como el límite entre los materiales Pre- y Post-Cañadas, pero no habría un “mortalón” buzando hacia el norte, sino que posiblemente habría varias depresiones solapadas relacionadas con los sucesivos edificios volcánicos colapsados y entre las que podrían existir barreras hidrogeológicas más o menos impermeables que las separan (Martí y Gudmundsson, 2000; Pous et al., 2002; Coppo et al., 2008a) (Figura 2.3.). Por tanto, el flujo de agua subterránea en el interior de la Caldera de Las Cañadas no estaría tan condicionado por el gradiente hidráulico que generaría el plano inclinado del “mortalón”, sino por el nivel del zócalo en el interior de cada depresión y por el grado de conexión hidráulica entre ellas, además

de por la existencia de materiales de baja permeabilidad bajo el CTPV y por los diques de los diferentes dominios: CTPV y Dorsales Noroeste y Noreste (ver Figura 1.28.). En el Valle de Icod-La Guancha, el flujo del agua subterránea mantendría el mismo patrón de funcionamiento que en el modelo por deslizamiento lateral.

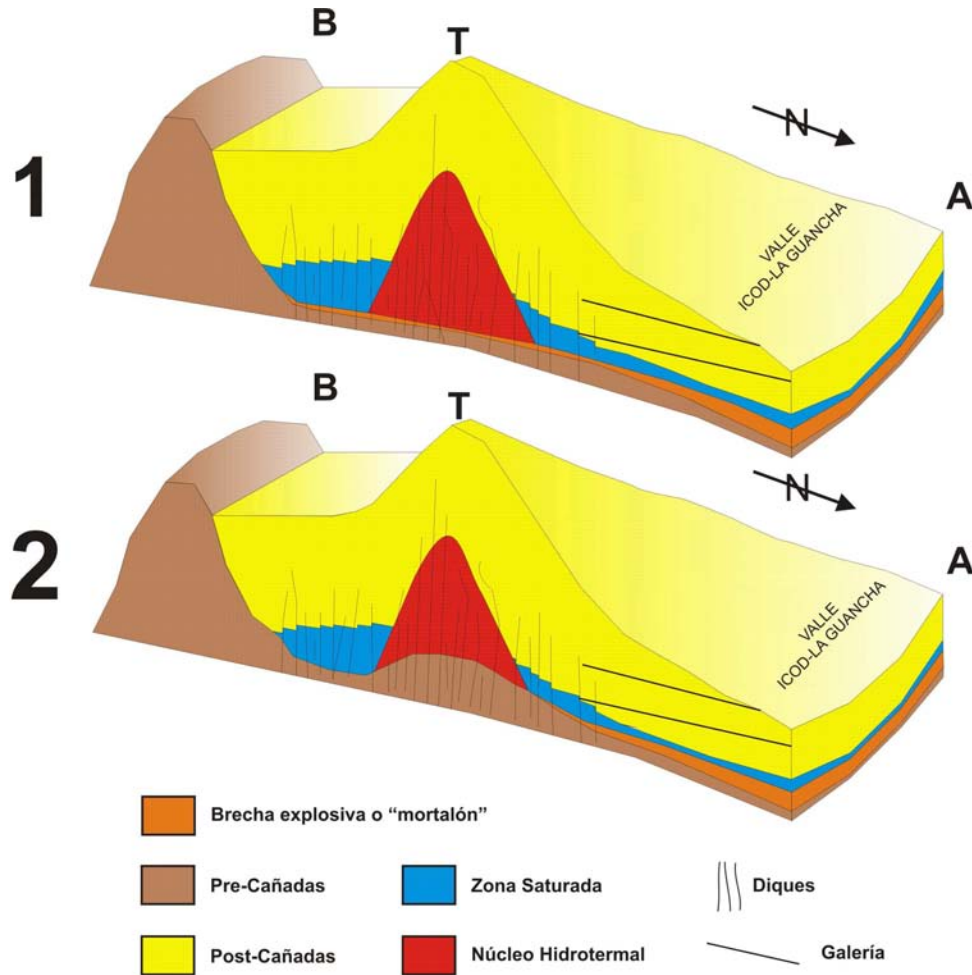


Figura 2.3 Cortes hidrogeológicos esquemáticos del acuífero de Las Cañadas del Teide, en función de las diferentes hipótesis sobre el origen de la caldera: 1: deslizamiento lateral; 2: colapso vertical. Ubicación del corte en la Figura 2.2. T: Teide.

Aún cuando en la actualidad la controversia sobre el origen de la caldera de Las Cañadas se mantiene vigente entre la comunidad científica internacional (Coppo et al., 2008a, 2008b; Márquez et al., 2008), el modelo de deslizamiento lateral es el que ha sido adoptado como "oficial" por el CIATFE para la planificación y gestión del acuífero de Las Cañadas (PHI, 1996), tal vez obviando la necesidad de contrastar con el modelo de colapso vertical, y observar cuál de los dos se ajusta mejor a los datos reales disponibles.

En base a esta observación, el objetivo principal de este capítulo es el de tratar de **reconstruir la morfología aproximada del medio físico o poroso** del acuífero de Las

Cañadas utilizando diversa información procedente de estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos recientes así como de las galerías, pozos y sondeos que penetran en la zona de estudio, para así comparar el modelo "oficial" o de deslizamiento lateral con el modelo "alternativo" o de colapso vertical, y evaluar cuál de los dos modelos se ajusta mejor a los datos disponibles.

Tras esta breve introducción, el presente capítulo está estructurado en otras 3 secciones que comprenden una breve descripción de la **metodología** llevada a cabo, seguida de una exposición de toda la información recopilada, discretizada, georeferenciada e interpretada sobre la **geometría de la zona saturada** del acuífero de Las Cañadas. Por último, se presentan los **resultados** obtenidos al combinar todos los datos con la elaboración de un modelo físico de la geometría y características del acuífero de Las Cañadas.

2.2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del nuevo modelo, el primer paso fue llevar a cabo una recopilación y síntesis de toda la bibliografía disponible del acuífero de Las Cañadas en el momento de la elaboración de la presente tesis, obteniéndose de diversos estudios geológicos (Ablay y Martí, 2000; Márquez et al., 2008), hidrogeológicos (MOPU-UNESCO, 1970-75; Navarro, 1995; Farrujia et al., 2001a, 2001b, 2004, 2006) y geofísicos (Aubert y Kieffer, 1998; Watts y Masson, 2001; Masson et al., 2002; Pous et al., 2002) una gran cantidad de datos sobre la posición real (absoluta) y la posición estimada tanto del zócalo impermeable como de la superficie freática, determinando así la geometría de la zona saturada del acuífero.

El siguiente paso fue crear una base de datos con toda la información recopilada, tanto de los estudios antes mencionados como de los informes proporcionados por el CIATFE sobre las galerías y pozos del área de estudio. En la mayoría de dichos informes, la mayor parte elaborados durante el Proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-75) y actualizados posteriormente por el CIATFE, se adjunta una descripción geológica de los materiales que atraviesan así como del caudal y cota a la que se produce el/los alumbramiento/s de agua en el interior de cada galería. Esta información ha sido muy útil a la hora de elaborar el modelo físico, sobre todo en el Valle de Icod-La Guancha, que es donde existe la mayor proporción de estas obras de captación de todo el área de estudio (Figura 2.4.).

Posteriormente, con la ayuda de un sistema de información geográfico (SIG, o GIS en inglés), se procedió a georeferenciar dicha información, creando diferentes capas sobre los mapas de sombras y ortofotos del área de estudio. Los atributos asignados a dichas capas hacen referencia principalmente a las cotas inferidas de la superficie freática y/o del zócalo impermeable.

Por último se realizaron diferentes perfiles tratando de integrar toda la información georeferenciada con el fin de validarla y de obtener un modelo en 3-D del medio poroso del acuífero de Las Cañadas.

2.3. GEOMETRÍA DE LA ZONA SATURADA

En el área que comprende el acuífero de Las Cañadas del Teide y que coincide con la Zona III según el PHI (1996), existen un total de 69 obras de captación del agua subterránea (15 pozos y 54 galerías) y 6 sondeos de investigación, estos últimos limitados al ámbito de la Caldera de Las Cañadas (Figura 2.4).

Para la determinación de la geometría de la zona saturada del acuífero de Las Cañadas ha sido imprescindible implementar en un mismo modelo la información sobre el nivel freático y sobre la posición del zócalo impermeable procedente tanto de las obras de captación (galerías y pozos) y de los sondeos de investigación, como de los diferentes estudios geofísicos llevados a cabo en el área de estudio (Aubert y Kieffer, 1998; Watts y Masson, 2001; Masson et al., 2002; Pous et al., 2002; Márquez et al., 2008).

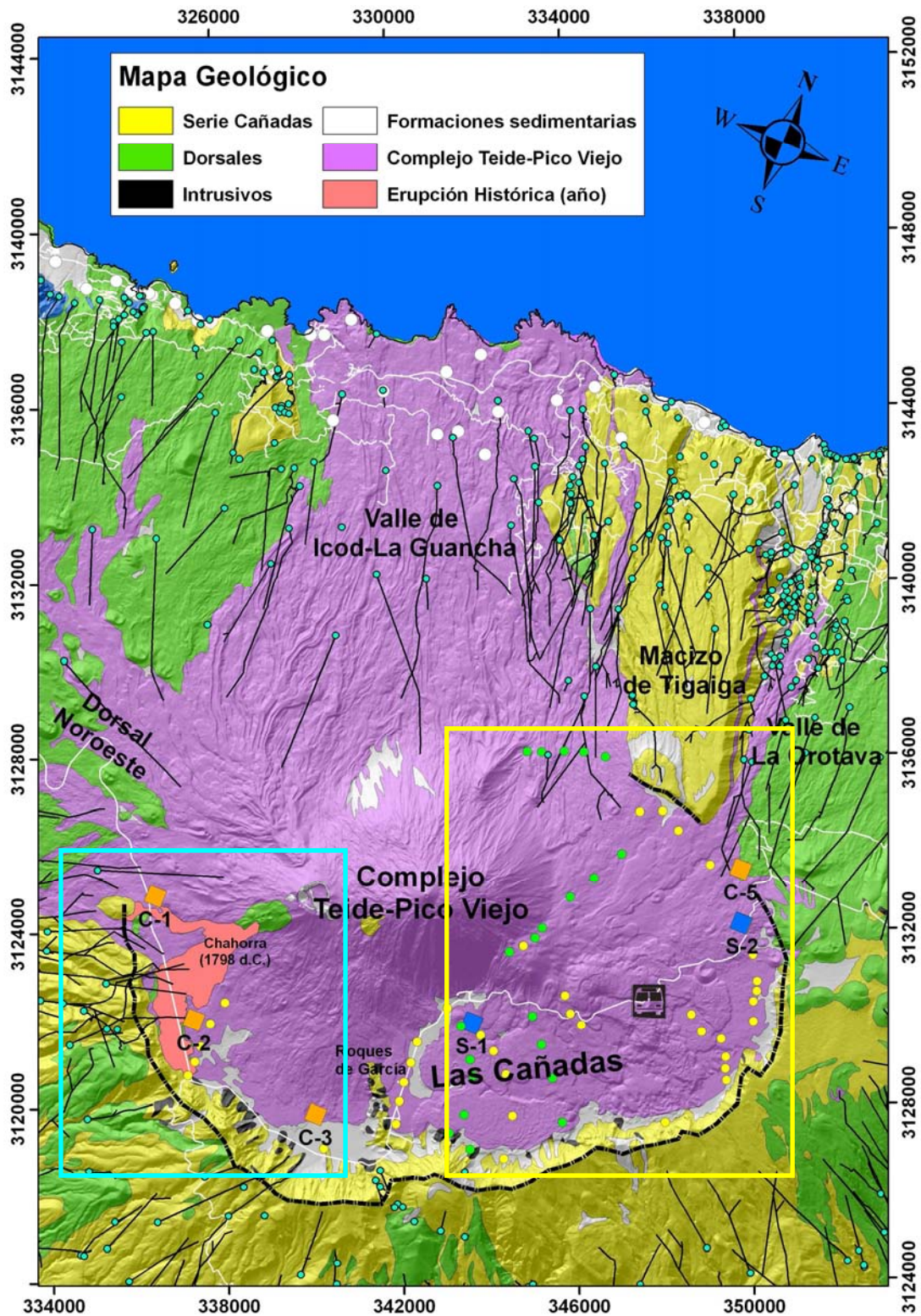


Figura 2.4. Mapa geológico de Las Cañadas, con la ubicación de las galerías (líneas negras, con círculo azul que representa la bocamina), pozos (círculos blancos) y los 6 sondeos de investigación perforados en Las Cañadas (cuadrados), así como los puntos de medida de AMT y MT (círculos amarillos) y de SP (círculos verdes) de Pous et al. (2002) y Aubert y Kieffer (1998), respectivamente. Línea discontinua negra: pared de Las Cañadas; línea blanca: carreteras principales. Rectángulos azul y amarillo: localización de la Figura 2.7. y 2.8., respectivamente. Más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

2.3.1. CALDERA DE LAS CAÑADAS

2.3.1.1. Sondeos de investigación

Respecto a los sondeos de investigación, entre los años 1970-75 se llevaron a cabo 4 de ellos (C-1, C-2, C-3 y C-5) dentro del marco del Proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975), mientras que los otros 2 sondeos (S-1 y S-2) fueron perforados por el CIATFE entre los años 1992 y 1995 (Farrujia et al., 2001a, 2001b). A partir de la revisión de la información contenida en varios informes del Proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975), y en los trabajos de Ablay y Martí (2000), Farrujia et al (2001a) y Soler et al. (2004), se ha podido reconstruir las características litológicas y paleomagnéticas de dichos sondeos (Figura 2.5. y Tabla 2.1.).

Tabla 2.1. Resumen de las principales características de los 6 sondeos de investigación realizados en el interior de Las Cañadas. Prof.: profundidad. Fuentes: MOPU-UNESCO (1970-1975) y Farrujia et al. (2001a).

Nº	89	90	91	92	1	2
Sigla	C-1	C-2	C-3	C-5	S-1	S-2
Nombre	Cruz de Tea	Chafarí	Ucanca	El Portillo	Montaña Majúa	El Portillo
X UTM (m)	332721	334744	338414	345838	341108	346388
Y UTM (m)	3125918	3123454	3122434	3131970	3125972	3130781
Altitud (m.s.n.m)	2057	2063	2014	2057	2264	2133
Prof. (m)	280	216	167	152	505	404
Año perforación	1970-1975	1970-1975	1970-1975	1970-1975	1992-1993	1993-1995
Altura nivel piezométrico*	1857	<1847	1926	<1905	1819,6	1779,5
Observaciones	Nivel situado en materiales de la Serie Cañadas	Seco	Nivel descendió 6 m entre 1975 y 1977	Seco	Registro automático desde 1999	Registro manual del nivel piezom.

*Al finalizar la perforación (m.s.n.m.).

En la Figura 2.5. se ha representado tanto las columnas litológicas de los sondeos C-1, C-2, C-3, S-1 y S-2 de Ablay y Martí (2000) (columna izquierda) como las de los sondeos C-1 a C-5 del SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975) y las de los sondeos S-1 y S-2 de Soler et al. (2004) (basadas en el trabajo de Farrujia et al., 2001a) (columna derecha). En el caso de los sondeos C-1 a C-5, también se disponía de datos paleomagnéticos de los materiales atravesados procedente del proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975) y cuya información también se ha incluido en la Figura 2.5..

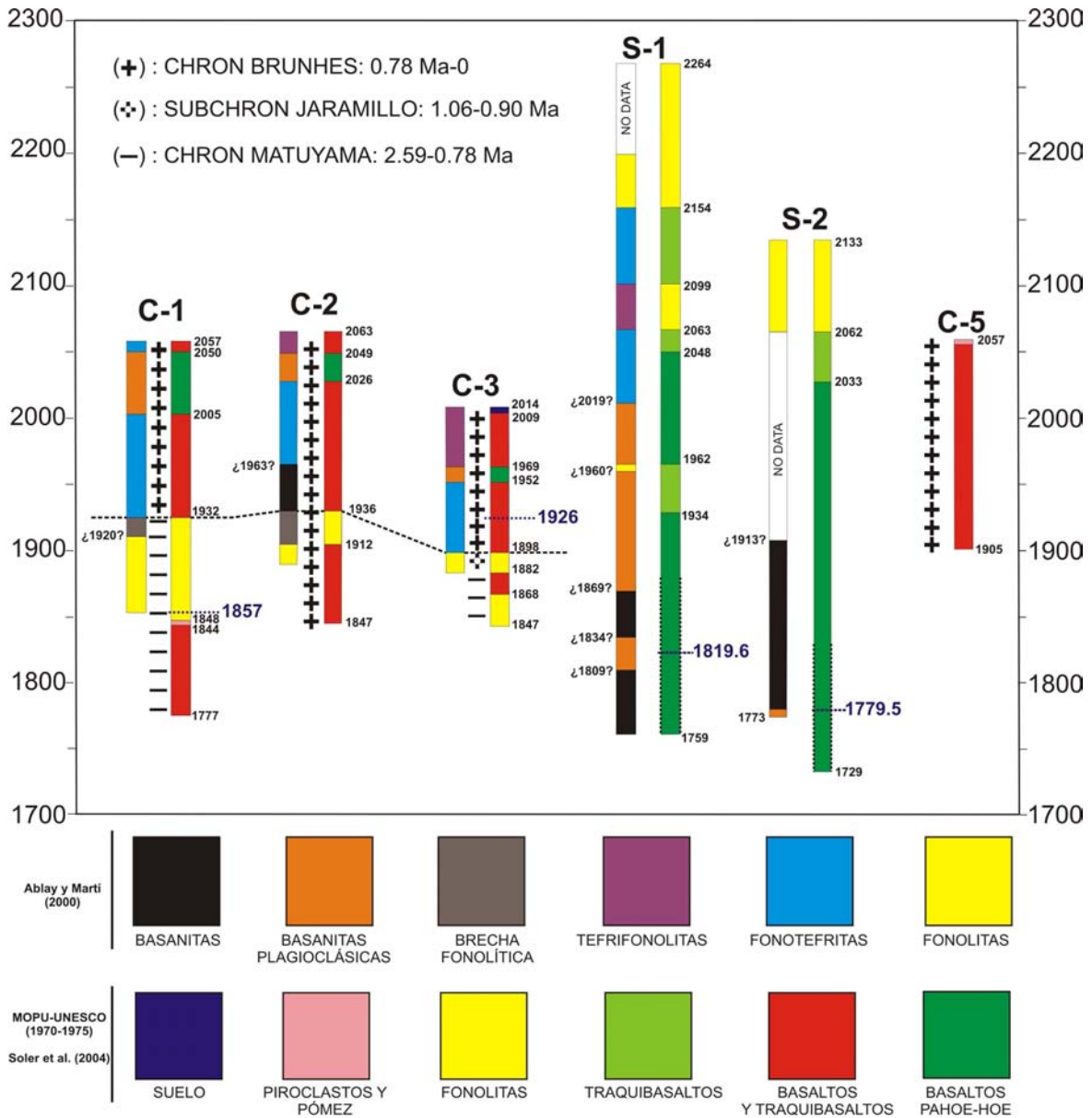


Figura 2.5. Reconstrucción de las columnas de los sondeos realizados en Las Cañadas a partir de los informes litológicos y/o paleomagnéticos del propio proyecto (para los del SPA-15) o de Soler et al. (2004) (para los del CIATFE) y del estudio de Ablay y Martí (2000), columnas derecha e izquierda, respectivamente. La posición relativa de los sondeos en esta figura coincide con su distribución siguiendo relativamente bien (excepto para S-1) el perímetro sur de la caldera en el sentido opuesto a las agujas del reloj. Línea discontinua negra: contacto teórico entre materiales Pre- y Post-Cañadas según Ablay y Martí (2000). También se ha incluido la cota a la que se encontró agua en el momento de la perforación en los diferentes sondeos (línea discontinua y valores en azul, en m.s.n.m.)

A grandes rasgos, no hay mucha diferencia entre las columnas litológicas aportadas por unos y otros trabajos, a excepción de los materiales identificados como basaltos pahoe-hoe y como basaltos y traquibasaltos en el SPA-15 y por Soler et al. (2004), respectivamente, que fueron descritos como fonotefritas o tefrifonolitas por Ablay y Martí (2000). Adicionalmente, es importante destacar que según la interpretación de Ablay y Martí (2000), los sondeos C-1, C-2 y C-3 del sector oriental de Las Cañadas cortarían a 1932, 1936 y 1898 m.s.n.m. respectivamente los materiales de la Serie Pre-Cañadas, que representa el teórico zócalo impermeable, que ha

sido indicado en la Figura 2.5. como una línea negra discontinua. Si bien esta observación parece coincidir para los sondeos C-1 y C-3 con la interpretación litológica realizada en el SPA-15, no es así para el sondeo C-2. En el SPA-15 se infiere que este sondeo corta materiales fonolíticos a los 1936 m.s.n.m. pero no fueron identificados como de la Serie Pre-Cañadas. Un argumento a favor de esta interpretación son los datos paleomagnéticos de los sondeos del SPA-15. En la Figura 2.5. se observa que los materiales que atraviesan los sondeos C-2 y C-5 se mantienen siempre con polaridad positiva, indicando que pertenecen al Chron Brunhes y por tanto, con una edad inferior a los 0,78 Ma (Merrill et al., 1996). Por el contrario en los sondeos C-1 y C-3, se observa claramente el cambio de polaridad al cortar las fonolitas, identificadas en todos los trabajos como de la Serie Pre-Cañadas, a 1932 y 1898 m.sn.m.m., respectivamente. Incluso en el sondeo C-3 se ha detectado materiales del subchron Jaramillo, datado entre 1,06 y 0,90 Ma (Merrill et al., 1996), y que corresponden según el propio proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975) a una brecha fonolítica intercalada entre los materiales Pre- y Post-Cañadas, pero que no fue identificada como "mortalón". Por tanto, la información paleomagnética sugiere que la interpretación del SPA-15 para la columna litológica del sondeo C-2 es más acertada que la realizada por Ablay y Martí (2000). Tomando en cuenta estas observaciones, en la presente tesis se ha considerado que los sondeos C-1 y C-3 son los únicos de los 6 sondeos que alcanzan el límite entre los materiales de las Series Pre- y Post-Cañadas y que en ninguno de ellos se ha observado el depósito de deslizamiento o "mortalón".

Respecto a la información sobre el nivel piezométrico en el sector oriental de Las Cañadas, es decir, al este de Los Roques de García, en la Figura 2.5. se puede comprobar que en los sondeos S-1 y S-2, independientemente de las diferencias interpretativas entre las columnas litológicas de Ablay y Martí (2000) respecto a las de Soler et al. (2004), la zona saturada está principalmente en contacto con materiales máficos (basaltos o basanitas) de la Serie Post-Cañadas (procedentes del CTPV). En el sondeo C-5 ubicado en el extremo oriental de la Caldera, el cual atraviesa casi exclusivamente basaltos y traquibasaltos, no se alcanzó la zona saturada.

En los sondeos S-1 y S-2, el CIATFE ha llevado a cabo un seguimiento de la cota y evolución de la superficie piezométrica, entre otros parámetros físico-químicos del agua subterránea, desde el año 1993 y 1995, respectivamente, hasta la actualidad (Farrujia et al., 2001a, 2001b, 2004, 2006). En la Figura 2.6 se ha representado la evolución de los niveles piezométricos en ambos sondeos frente a las precipitaciones mensuales promedio (en decenas de mm) ubicadas en Las Cañadas (datos obtenidos de las estaciones meteorológicas C406G y C405G pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)). La variación máxima absoluta del nivel piezométrico en el sondeo S-1 es aproximadamente de 3 m (entre 1817 y 1820 m.s.n.m.) entre 1993 y 2007 ($0,13 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$), aunque se han observado periodos de estabilización e incluso recuperación del nivel piezométrico tras épocas de lluvias intensas como las de diciembre de 2002 (Farrujia et al., 2004). Por el contrario, en el sondeo de investigación S-2 ubicado en el sector oriental de Las Cañadas, la variación del nivel piezométrico ha sido mucho más importante, observándose un descenso continuado e ininterrumpido de los niveles

de más de 15 m (de aproximadamente $2,4 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$, Farrujia et al., 2006). Esta diferencia en la evolución de la superficie piezométrica entre ambos sondeos ha sido interpretada como consecuencia de la cercanía del sondeo S-2 a una serie de galerías que penetran en la cubeta de Las Cañadas desde el sector nororiental (está a menos de 5 km del frente de las galerías Nº 13 (ALM), 14 (CUM) y 16 (BVA), y que extraen un caudal aproximado de aguas subterráneas procedentes del acuífero superior a los $400 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, impidiendo la recuperación del nivel piezométrico cuando se produce una mayor recarga, tal y como sí se ha constatado en el sondeo S-1 (Farrujia et al., 2004).

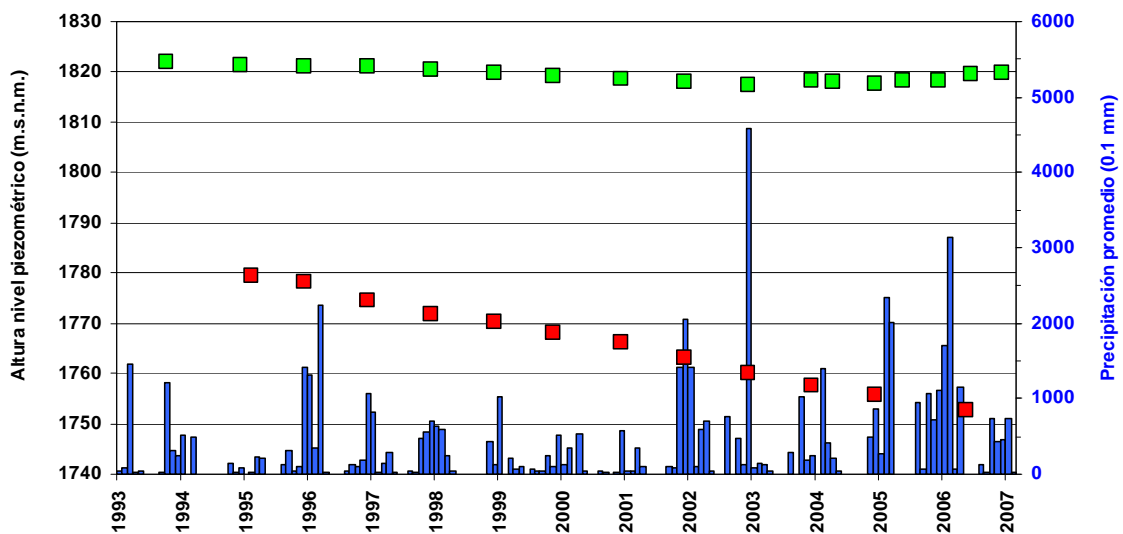


Figura 2.6. Evolución del nivel piezométrico entre 1993 y 2007 en los sondeos S-1 (verde) y S-2 (rojo), junto a la precipitación mensual promedio (en decenas de mm) de las estaciones meteorológicas de la AEMET C405G y C406G ubicadas en Las Cañadas.

En el sector occidental de la Caldera de Las Cañadas (al oeste de Los Roques de García), los sondeos C-1 y C-3 alcanzaron la zona saturada del acuífero en el momento de su perforación, no así en el sondeo C-2. En el sondeo C-1, según la información del SPA-15, el nivel piezométrico estaba a 1857 m.s.m.n. en contacto con fonolitas de la Serie Pre-Cañadas, es decir, por debajo del teórico zócalo impermeable que representa el límite entre el relleno de la caldera y el basamento Pre-Cañadas. Este hecho, aunque aislado, viene a poner de manifiesto que si bien el contraste de permeabilidad entre las Series Pre- y Post-Cañadas justifica que el límite entre ambas series se considere en la presente tesis como el zócalo impermeable (Navarro, 1995), en este punto en particular, la zona saturada no se encuentra en los materiales superiores permeables sino dentro de los materiales inferiores que funcionarían a modo de acuitardo, pudiendo almacenar agua pero con un flujo mucho más lento comparativamente hablando.

En el sondeo C-3, según lo descrito en el SPA-15, el nivel piezométrico se encontró a 1926 m.s.n.m. en el momento de la perforación, aunque durante los dos años siguientes (entre 1975 y 1977) éste descendió 6 m, a razón de $3 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$. A la cota de 1926 m.s.n.m., la

columna litológica de Ablay y Martí (2000) de este sondeo identifica fonotefritas mientras que según el propio proyecto SPA-15 se tratan de basaltos y traquibasaltos. Teniendo en cuenta que el límite entre los materiales Pre y Post-Cañadas se encuentra a los 1898 m.s.n.m., el espesor mínimo de la zona saturada sería de 28 metros aproximadamente en el momento de la perforación, aunque según lo observado en el sondeo C-1, el límite inferior de la zona saturada se podría encontrar dentro de los materiales Pre-Cañadas y, por tanto, a una mayor profundidad.

La altura del nivel piezométrico en la Caldera de Las Cañadas estimada a través de los sondeos C-1 y C-3 en el sector occidental (entre 1926 y 1857 m.s.n.m.) y de los sondeos S-1 y S-2 en el sector oriental (entre 1820 y 1780 m.s.n.m.) es considerablemente distinta. No obstante, dado que los datos de unos y otros corresponden al momento de finalizar la perforación, hay entre 16 y 20 años entre los dos grupos de datos y tal vez esto justifique la diferencia. Desgraciadamente, los 4 sondeos del SPA-15 se encuentran desde hace varios años totalmente inutilizables para poder medir la altura actual del nivel piezométrico en ellos o para tomar muestras del agua subterránea. Por tanto, como una primera aproximación a la posible posición actual de la zona saturada se ha efectuado un sencillo cálculo: teniendo en cuenta que en el C-3 el nivel piezométrico descendió 6 metros en dos años ($3 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$) una tendencia similar a la observada en el sondeo S-2 (Farrujia et al., 2006), si se supone que dicho descenso se hubiera mantenido uniforme con el tiempo hasta el año 2007, la altura del nivel piezométrico en el sondeo C-3 tendría una altura de 1830 m.s.n.m., similar a la del sondeo S-1 en esas mismas fechas (1820 m.s.n.m. aproximadamente).

2.3.1.2. Galerías y pozos

En este estudio se ha llevado a cabo una revisión detallada de la información geológica e hidrogeológica suministrada por los pozos y galerías del acuífero de Las Cañadas contenida tanto en las fichas de dichas obras de captación elaboradas durante el SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975) como en los interesantes trabajos sobre el área de estudio de Navarro (1995) y Márquez et al. (2008). Con toda esta información recopilada de los pozos y galerías del acuífero de Las Cañadas se ha elaborado la Tabla A.2.1 del Anexo A.1. En esta tabla, además de determinar la altura del nivel piezométrico de cada obra de captación, se ha tratado de describir la litología de cada una, diferenciando entre las distintas unidades geológicas descritas en el Capítulo 1, es decir, entre materiales de las Series Dorsales (Noreste y Noroeste), de la Serie Cañadas y del Complejo Teide-Pico Viejo, haciendo especial hincapié en la posición del depósito brechoide conocido como "mortalón".

Con el fin de determinar la geometría de la zona saturada del acuífero de Las Cañadas en la zona con mayor cantidad de galerías que penetran en la caldera, es decir, en el tramo entre Boca Tauce y Chasogo, se ha realizado un perfil o corte hidrogeológico a partir de la información geológica e hidrogeológica de las galerías y del sondeo de investigación C-2 contenida en los informes de cada galería del CIATFE y en Navarro (1995) (Figura 2.7.).

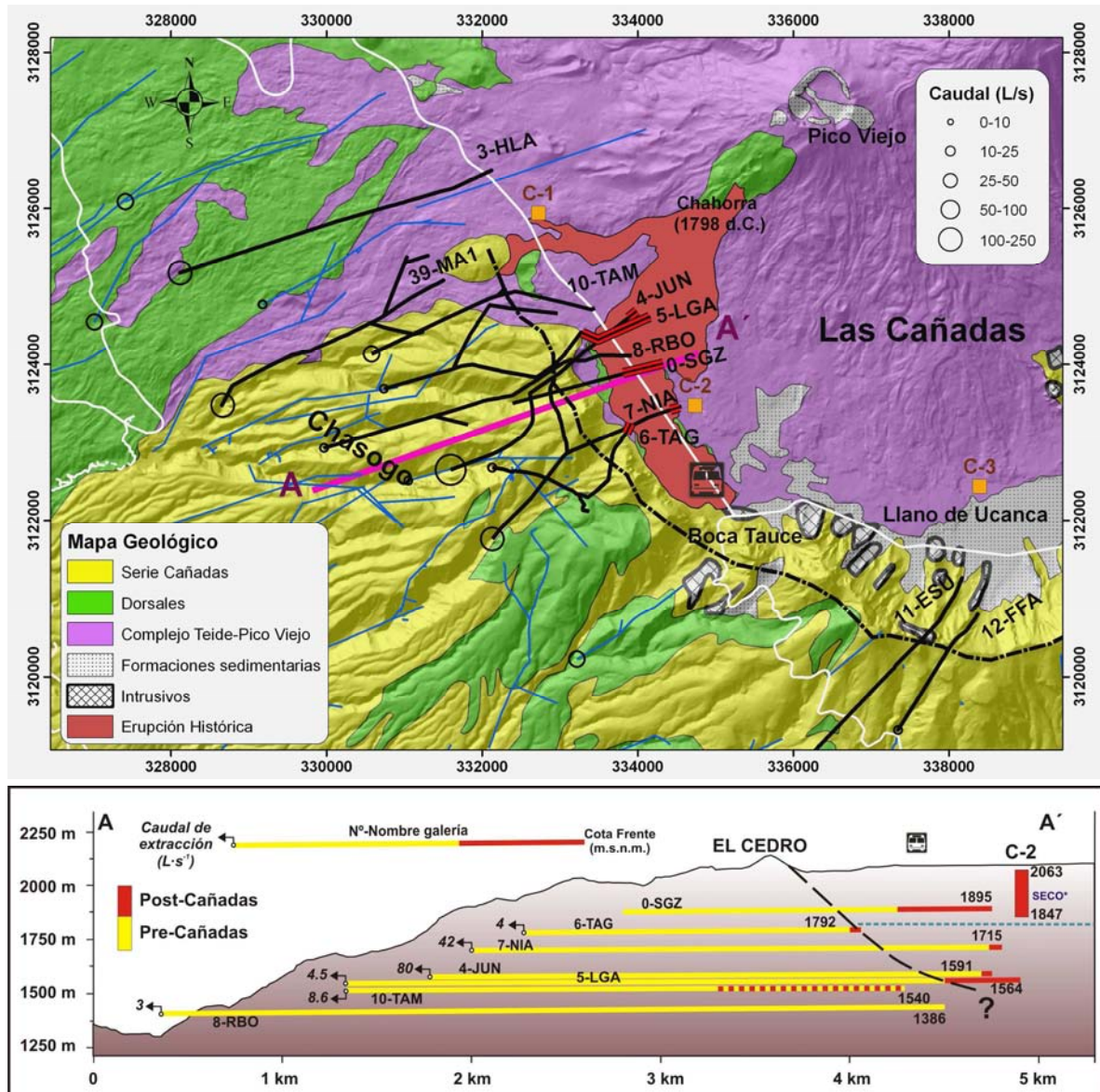


Figura 2.7. Mapa geológico (arriba) y corte hidrogeológico (abajo) del límite suroccidental del acuífero de Las Cañadas del Teide. En el mapa geológico (ver ubicación en Figura 2.4.) se puede observar la traza en rojo del tramo que atraviesa materiales Post-Cañadas cada una de las galerías representadas en el corte (en negro), con su número correspondiente, así como el resto de galerías de la zona (en azul). También se han indicado la traza de las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA). En el corte hidrogeológico se han representado el sondeo exploratorio C-2 y 7 galerías de las cuales se posee información geológica e hidrogeológica, así como la cota inferida del nivel freático, en m.s.n.m. (línea azul punteada). Línea negra discontinua: contacto inferido entre materiales Pre-Cañadas y Post-Cañadas. Ver más explicación en el texto.

En el corte hidrogeológico de la Figura 2.7. se ha representado la traza de cada galería y del sondeo distinguiendo la litología que atraviesan entre Serie Pre-Cañadas o Edificio Cañadas (en amarillo) y Serie Post-Cañadas o del CTPV (en rojo). En el mapa geológico también se puede observar el tramo que cada galería seleccionada atraviesa en los materiales de la Serie Post-Cañadas (en verde). En la Tabla 2.2. se han resumido las principales características geológicas e hidrogeológicas de las 7 galerías y del sondeo de investigación C-2 representadas en la Figura 2.7..

Tabla 2.2. Resumen de las galerías (G) y del sondeo de investigación (S.I.) C-2, representados en el corte de la Figura 2.7.. Coordenadas X (longitud) e Y (latitud) están referenciadas a la entrada o boca de la galería. También se incluyen los datos de Z (altitud), en m.s.n.m., de la entrada o boca (BC) y del frente (FR) o zona más profunda de cada galería o sondeo. En el caso de las galerías, el Z FR representado fue calculado teniendo en cuenta la longitud (Long.) de cada una (contando solo la galería principal, sin ramales) y que todas ellas suelen estar excavadas con una pendiente positiva de alrededor de 5:1000 (Coello, 1973).

Nº	Código	Sigla	T	X		Y		Z BC	Z FR	Long. / Prof. (m)	Pre- Cañadas	Post- Cañadas
				UTM (m)	UTM (m)	UTM (m)	UTM (m)					
10	1213503	TAM	G	330579	3124132	1525	1540	3072	0-2000			
4	1214702	JUN	G	331594	3122647	1575	1592	3350	0-3350	3350		
5	1213502	LGA	G	330739	3123687	1545	1564	3813	0-2800	2800-3200**		
8	1213406	RBO	G	329959	3122927	1365	1386	4200	0-4200			
0	1213501	SGZ	G	332389	3123502	1885	1895	2003	0-1500	1500-2003		
7	1214701	NIA	G	332134	3121762	1700	1715	3052	0-3000	3000-3052		
6	1214705	TAG	G	332129	3122677	1780	1792	2454	0-2350	2350-2454		
C-2	NO	C-2	S.I.	334744	3123454	2063	1847	216			0-216	

*Corresponde con el final de la zona con información geológica; **corresponde con la profundidad de la galería según la referencia.

A partir de la historia de los alumbramientos descritos por Navarro (1995) en las galerías de la zona, se ha observado que muchas de las galerías que han penetrado desde la periferia en los materiales de relleno de la Serie Post-Cañadas en este tramo han alcanzado el acuífero a diferentes niveles y profundidades, extrayendo a veces importantes caudales de agua, como las galerías Nº 4 (JUN) o 7 (NIA) (Figura 2.7.). Sin embargo ha habido algunas galerías que tras penetrar varios centenares de metros en la Serie Post-Cañadas han quedado por encima del nivel freático, como es el caso de la galería Nº 0 (SGZ).

A través de la interpolación entre las galerías secas y con agua se ha trazado la cota inferida del nivel freático, que está aproximadamente a los 1800 m.s.n.m., y que coincide con los datos del sondeo C-2 que afirman que siempre ha estado seco (MOPU-UNESCO, 1970-1975). Por otro lado, la galería Nº 8 (RBO), aunque la traza ha penetrado en la cuenca del interior de la Caldera, ésta se ha situado por debajo del límite entre los materiales Pre-Cañadas y los de relleno o Post-Cañadas, interceptando sólo los primeros y alumbrando reducidos volúmenes de agua, tal vez relacionados con pequeñas fugas del acuífero de Las Cañadas o almacenados en los materiales Pre-Cañadas de relativamente baja permeabilidad que atraviesa. Según Navarro (1995), los materiales de la Serie Pre-Cañadas que atraviesan estas galerías se tratan principalmente de basaltos muy compactados y alterados, con una importante deposición de minerales secundarios en forma de carbonatos, ceolitas y tal vez fluoritas, y que en general presentan una permeabilidad muy baja. No obstante, hacia el dominio de la Dorsal Noroeste los materiales de la Serie Pre-Cañadas presentan una fracturación secundaria cada vez más importante, que favorece la posibilidad de fugas del acuífero de Las Cañadas hacia ese sector, tal y como indican los relativamente elevados caudales de agua que drenan las galerías Nº 3 (HLA) ($38,8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) ó 39 (MA1) ($16,7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) (Figura 2.7.).

Tal y como se observa en la Tabla 2.2. y en la Figura 2.7., la galería Nº 10 (TAM) tiene una longitud total de 3072 metros, pero lamentablemente no se dispone de información

geológica más allá de los primeros 2000 metros y, por tanto, a partir de ese punto y hasta el frente se ha representado con línea punteada amarilla y roja indicando la incertidumbre de si corta o no materiales de la Serie Post-Cañadas. Por su parte, la columna litológica del sondeo C-2, discutida en el apartado anterior y donde se supuso que no cortaba los materiales Pre-Cañadas, concuerda con la litología de las galerías de la zona, confirmando aún más dicha hipótesis.

Con el objetivo de reproducir la geometría del teórico zócalo impermeable se ha tratado de reconstruir el contacto entre la Serie Pre-Cañadas y la Serie-Post Cañadas (línea negra discontinua en la Figura 2.7.). Como se puede observar en la Figura 2.7., las diferentes galerías de la zona no cortan a la misma distancia a los materiales de la Serie Post-Cañadas, debido posiblemente a que las galerías representadas tampoco están todas ubicadas en el mismo plano vertical y a que la superficie de contacto también puede ser irregular, como se observa en la parte visible de la pared de la caldera. Sin embargo, a partir de la prolongación subterránea de la pared y suponiendo una superficie cóncava (i.e. falla lístrica) que puede ser producto tanto de un deslizamiento lateral como de un colapso vertical, se observa que este contacto se ajusta relativamente bien con los límites litológicos entre las series, tanto en la galería Nº 6 (TAG) como de la galería Nº 5 (LGA) y, a su vez, es consecuente con la información de la galería Nº 8 (RBO). Es importante destacar en este punto que en ninguna de las galerías que han cortado la Serie Post-Cañadas se observó el depósito de deslizamiento lateral conocido como "mortalón", al menos en los tramos con información geológica.

Una información complementaria sobre la cota del nivel freático en el sector sur-occidental de Las Cañadas procede de las galerías Nº 11 (ESU) y 12 (FFA) (Figura 2.7.) las cuales penetran a 1913 y 2049 m.s.n.m., respectivamente, sólo unos pocos metros por debajo del Llano de Ucanca. Aunque sus frentes están dentro de la cuenca hidrográfica de Las Cañadas, la galería ESU, según la descripción geológica disponible hasta los 3090 m de longitud (en el año 2004 era de 3662 m), no llegaba a penetrar en los materiales de relleno del CTPV (ver Tabla A.2.1. del Anexo A2). No se dispone de los datos geológicos completos hasta su longitud actual de la galería ESU ni de la descripción geológica de la galería FFA para verificar dicha información. No obstante, dado que las aguas subterráneas que extraen ambas galerías son de una conductividad eléctrica mucho menor (del orden de $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ver capítulo 3.2 de la presente tesis) que las aguas del acuífero de Las Cañadas (promedio de $1518 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; Chiodini, 1994) y que presentan unas importantes variaciones estacionales del caudal (Navarro, 1995), aún en el caso de haber penetrado en los materiales relativamente más jóvenes y permeables de relleno del CTPV, es muy probable que ambas galerías se sitúen por encima de la zona saturada general. Por tanto, la zona saturada del acuífero de Las Cañadas en ese sector se debe encontrar por debajo de los 1913 m.s.n.m., en concordancia con la posible evolución temporal de los datos del nivel piezométrico del sondeo C-3.

2.3.1.3. Estudios geofísicos

En algunos sectores de la caldera de Las Cañadas se conoce con bastante precisión la geometría de la zona saturada gracias a la existencia de los 6 sondeos de investigación y a varias galerías que penetran desde el exterior. Sin embargo, aún existe en el interior de la depresión un amplio sector carente de información directa de la geometría de la zona saturada. Hasta la actualidad la única manera en la que se ha podido estimar la geometría del medio físico o poroso en el interior de la caldera ha sido a través de métodos indirectos como los estudios geofísicos llevados a cabo por Aubert y Kieffer (1998) y Pous et al. (2002), que se detallan a continuación.

■ Aubert y Kieffer (1998)

En el estudio llevado a cabo por Aubert y Kieffer (1998) se realizaron varios perfiles geoelectrónicos de autopotencial (self-potential, SP) en la mitad oriental de Las Cañadas (Figura 2.8.). En ellos se determinó el plano de separación (SPS) entre una capa resistiva superficial y otra conductiva subyacente, el cual corresponde a la superficie freática, en el caso de existir agua, o a un nivel impermeable alterado hidrotermalmente representado por el zócalo. En este trabajo no fue necesario reinterpretar y discretizar la información para implementarla en el modelo físico ya que la cota de la superficie SPS, es decir, del límite entre los materiales permeables superficiales y el zócalo impermeable o el nivel freático, había sido estimada directamente en el propio trabajo. Para ello, calibraron los resultados con los datos de la posición del nivel piezométrico en el sondeo Nº 1 (S-1) y en algunas galerías de la parte alta del Valle de Icod-La Guancha en las que también se conocía con precisión la posición del nivel piezométrico. Como se puede observar en la Figura 2.8., la cota inferida de la superficie SPS en la zona del sondeo Nº 1 (S-1) es de 1820 m.s.n.m., mientras que la cota real de la superficie piezométrica medida directamente en dicho sondeo (1818 m.s.n.m.) es muy similar (Figura 2.7.).

La morfología de la superficie SPS inferida a través de este estudio varía de unas zonas a otras significativamente: en los puntos de medida del sector central de Las Cañadas la cota de la superficie SPS estimada es relativamente horizontal, pero alcanzando siempre los mínimos en la zona central, posiblemente representando la posición de la superficie freática; sin embargo, entre la zona del sondeo Nº1 y Montaña Blanca hay un aumento demasiado elevado de la superficie SPS como para representar la superficie freática, indicando que posiblemente dicha superficie representa aquí el límite superior de un núcleo de alteración hidrotermal que se extiende como mínimo bajo el centro eruptivo sálico de Montaña Blanca (Ablay et al., 1995).

Ya hacia el sector oriental, la superficie SPS desciende con una pendiente muy pronunciada hasta la cota 1700, a partir de la cual ésta se suaviza considerablemente. Es posiblemente a esta cota donde la señal detectada de autopotencial corresponde a la transición de núcleo de alteración hidrotermal a superficie freática. Para diferenciarlos, en la Figura 2.8. se

ha representado con círculos rojos los puntos de medida de SP en los que se ha tomado la superficie SPS como posiblemente perteneciente al límite superior del núcleo de alteración hidrotermal, mientras que los círculos verdes pertenecen probablemente a la cota estimada de la superficie freática.

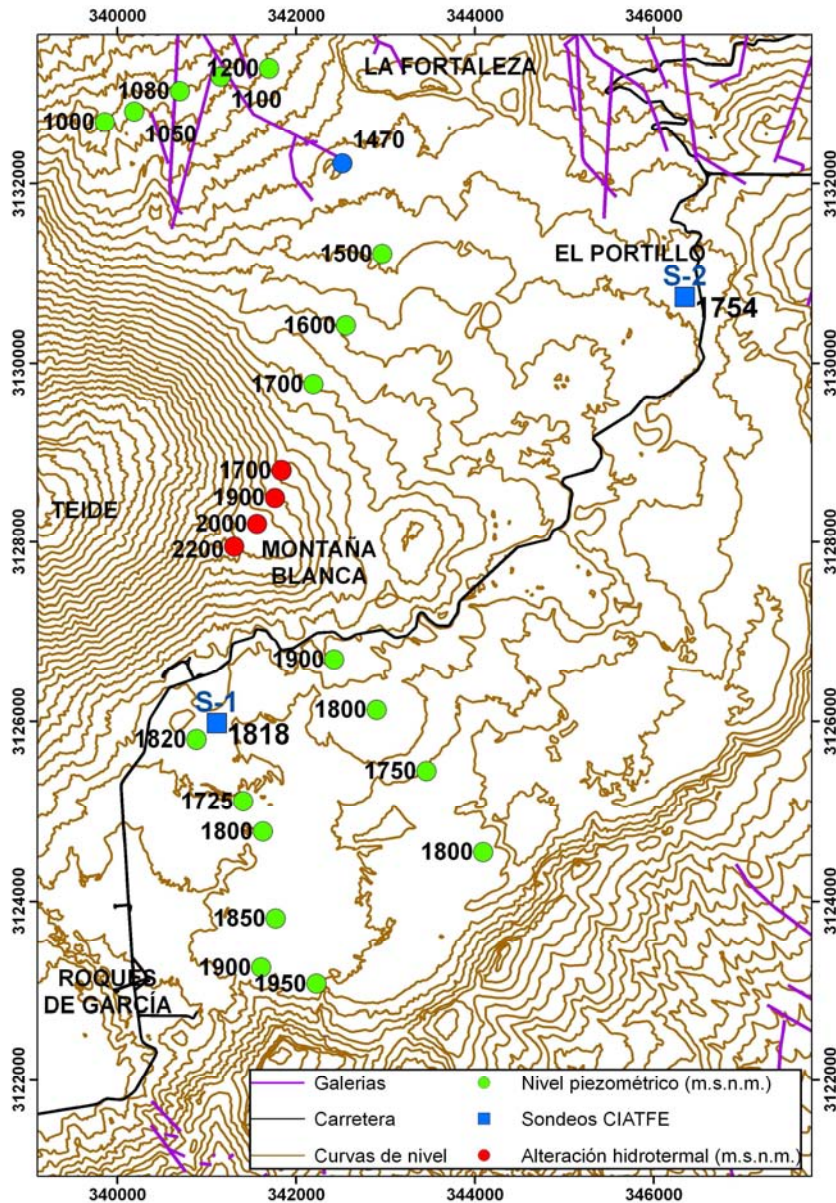


Figura 2.8. Mapa de la mitad oriental de Las Cañadas (ver ubicación en la Figura 2.4.) con los puntos de medida de SP (en verde y rojo) indicando la cota aproximada de la superficie SPS inferida, junto a las galerías de la zona (traza malva) y a los sondeos S-1 y S-2 con la cota del nivel piezométrico medida en cada uno de ellos (en m.s.n.m.), según Farrujia et al. (2004). El círculo azul representa la cota del nivel piezométrico en la galería N° 16 (BVA). Modificado de Aubert y Kieffer, (1998).

■ Pous et al. (2002)

En el estudio de Pous et al. (2002) se realizaron en el interior de Las Cañadas un total de 6 perfiles con varios puntos de medida de magnetotelúrica (MT) y audiomagnetotelúrica

(AMT) (Figura 2.9.), a partir de los cuales se observó la existencia de una capa muy conductiva, que generalmente correspondía a la zona saturada del acuífero de Las Cañadas, entre dos capas resistivas (Figura 2.10.). La capa resistiva superior se corresponde con materiales jóvenes y poco alterados de lavas recientes y depósitos de caída de los materiales Post-Cañadas del relleno de la caldera, que fue interpretada como la zona no saturada del medio, mientras que el límite superior de la capa conductiva (LSCC) se asoció, al igual que la superficie SPS en el estudio de Aubert y Kieffer (1998) tanto a la superficie freática como a zonas alteradas hidrotermalmente (Pous et al., 2002). Siendo los materiales de la Serie Pre-Cañadas más antiguos y compactos que los de la Serie Post-Cañadas (Navarro, 1995), y por tanto menos conductivos, el límite inferior de la capa conductiva (LICC) fue asociado por Pous et al. (2002) con el contacto entre ambas series o con un aumento brusco de la alteración hidrotermal con la profundidad.

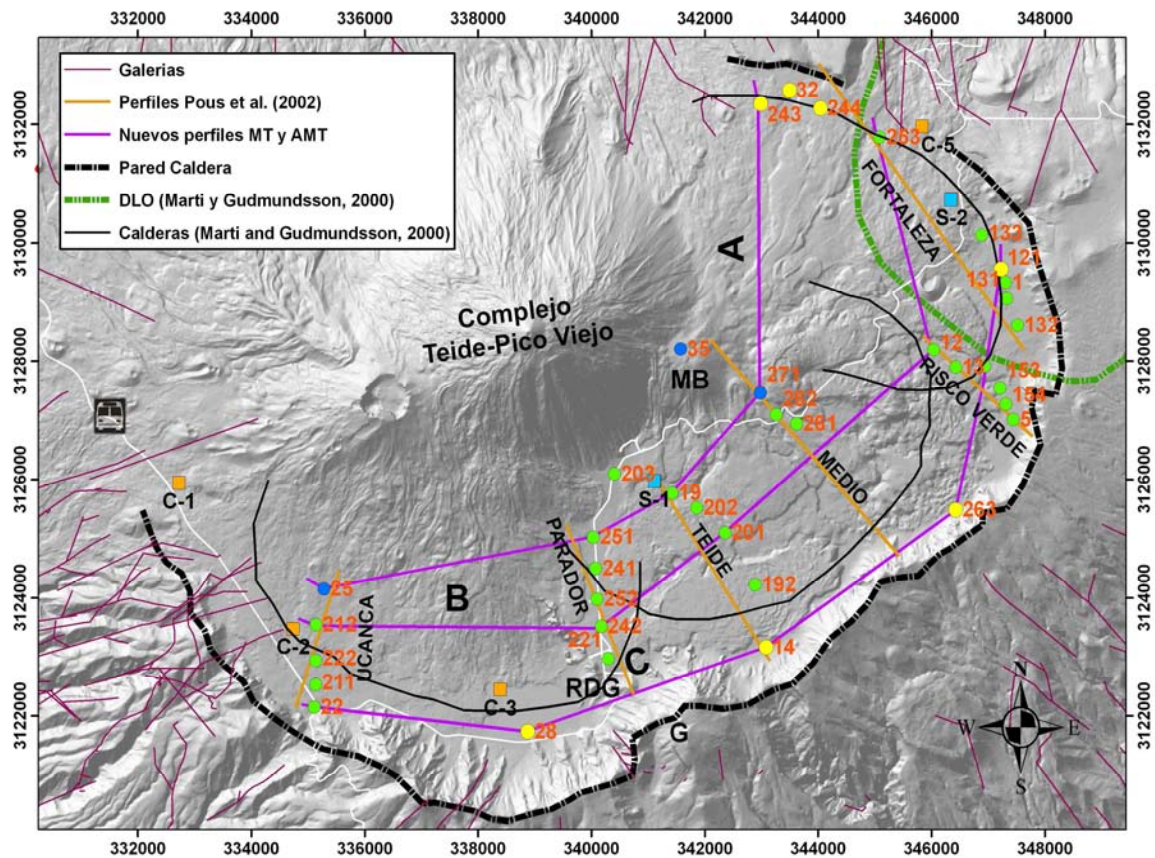


Figura 2.9. Mapa de sombras de Las Cañadas y el CTPV donde se han representado los puntos de medida de AMT y MT de Pous et al. (2002) (círculos) así como la localización de los perfiles del propio trabajo (líneas naranjas) y la de los nuevos perfiles elaborados en la presente tesis (líneas violetas) utilizando dichos datos. También se ha representado la cabecera del deslizamiento de La Orotava (DLO) y los límites de las tres posibles calderas de colapso vertical, ambos según Martí y Gudmundsson (2000). Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

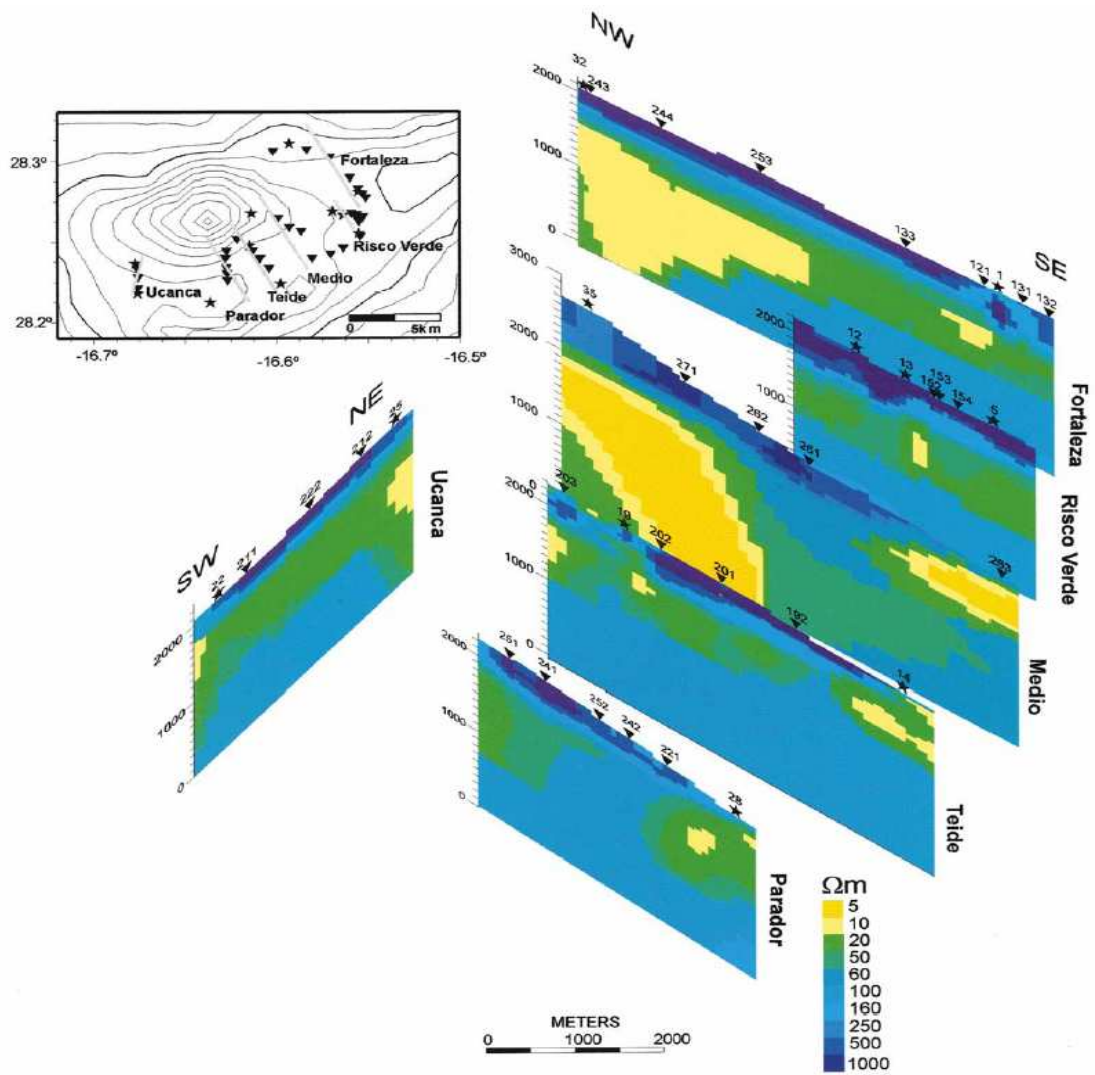


Figura 2.10. Modelos en 2-D de los perfiles de MT (estrellas) y AMT (triángulos) en la Caldera de Las Cañadas. De Pous et al. (2002).

Para georeferenciar los datos de este estudio, a diferencia del trabajo de Aubert y Kieffer (1998), como sólo se disponía de los perfiles originales fue necesario discretizar y georeferenciar la información contenida en los perfiles, tratando de asignar a cada punto de medida de AMT o MT las cotas inferidas de los LSCC y LICC, en la vertical del mismo (Tabla 2.3.).

Tabla 2.3. Cota inferida del límite superior (LSCC) e inferior (LICC) así como del nivel freático (N.F. CIATFE) y del zócalo impermeable (ZOCALO CIATFE), en m.s.n.m., en cada punto de medida de los diferentes perfiles de AMT según el modelo en 2-D de Pous et al. (2002) y según el modelo Fly-Subterráneo del CIATFE, respectivamente. Ver más explicación en el texto.

PERFIL UCANCA	25	212	222	211	22				
LSCC	1850	1800	1800	1800	1800				
N.F. CIATFE	1800	1775	1800	1800	1800				
LICC	800	1000	1000	1300	1300				
ZOCALO CIATFE	1500	1650	1650	1710	1710				
PERFIL PARADOR	251	241	252	242	221	28			
LSCC	1650	1800	1850	1875	1900	1850			
N.F. CIATFE	1805	1810	1825	1825	1825	1825			
LICC	700	800	1600	1650	1750	1300			
ZOCALO CIATFE	1515	1575	1630	1675	1700	1725			
PERFIL TEIDE	203	19	202	201	192	14			
LSCC	1800	1800	1775	1850	1850	2100			
N.F. CIATFE	1815	1815	1815	1815	1830	1835			
LICC	1000	1100	1200	1200	1500	1300			
ZOCALO CIATFE	1500	1525	1575	1620	1680	1700			
PERFIL MEDIO	35	271	262	261	263				
LSCC	2100	1900	1800	1000	2000				
N.F. CIATFE	1815	1810	1812	1815	1850				
LICC	800	1000	1500	1000	1300				
ZOCALO CIATFE	1500	1490	1500	1500	1700				
PERFIL RISCO VERDE	12	13	152	153	154	5			
LSCC	1500	1600	1650	1675	1700	1700			
N.F. CIATFE	1820	1820	1820	1830	1830	1830			
LICC	1000	1000	1000	900	800	800			
ZOCALO CIATFE	1500	1550	1600	1650	1700	1700			
PERFIL FORTALEZA	243	32	244	253	133	121	1	131	132
LSCC	1575	1550	1550	1500	1475	1550	1500	1550	1600
N.F. CIATFE	1550	1610	1600	1760	1815	1825	1825	1825	1827
LICC	300	500	300	800	900	1000	1000	1100	1200
ZOCALO CIATFE	1320	1350	1450	1500	1000	900	900	1000	1650

En la Tabla 2.3. se ha incluido en cada punto de medida de los respectivos perfiles tanto los valores del LSCC y LICC inferidos en la presente tesis a partir de Pous et al. (2002), como aquellos del nivel freático (N.F. CIATFE) y del zócalo impermeable (ZOCALO CIATFE) que en la misma posición fueron utilizados por el CIATFE en la elaboración de su modelo de flujo (SURGE, 2002) y que fueron facilitados al autor de la presente tesis por dicho organismo. Mientras que el valor del LSCC coincide muchas veces con el del N.F. CIATFE, la cota del LICC diverge muchas veces de la cota del zócalo del CIATFE. Este límite fue estimado por el CIATFE a partir de la morfología del zócalo impermeable inferida en el Valle de Icod-La Guancha a través de las galerías y pozos, y luego extrapolada hacia el interior de Las Cañadas teniendo en cuenta los datos de los sondeos y las galerías que penetran desde la periferia (I.Farrujia, comunicación personal).

Los valores inferidos del LSCC, al igual que en el estudio de Aubert y Kieffer (1998), se pudieron comparar en los puntos de medida próximos al sondeo S-1 (203 y 19) con la altura real del nivel piezométrico en el mismo (1818 m.s.n.m. aproximadamente), observándose un buen ajuste. Lo mismo sucedió en el sector occidental de Las Cañadas, donde los puntos de medida del perfil "Ucanca" infieren una altura del LSCC de entre 1750 y 1800 m.s.n.m., que concuerda muy bien con los datos procedentes de las galerías y sondeos de la zona (Figura

2.7.). Sin embargo, en el sondeo Nº 2 (S-2), próximo a la pared oriental de Las Cañadas, se observa que el LSCC en los puntos de medida próximos (253 y 133) está situado muy por debajo (entre 1475 y 1500 m.s.n.m., respectivamente) del nivel piezométrico medido en dicho sondeo (aproximadamente 1780 m.s.n.m., Figura 2.5.), indicando que posiblemente el LSCC en esta zona represente una zona de alteración hidrotermal en vez de la superficie freática del acuífero. De hecho, los frentes de las galerías Nº 13 (ALM) y 14 (CUM), situados a menos de 2 km de distancia del sondeo Nº 2 (S-2), penetran en los materiales de la Serie Post-Cañadas a 1475 y 1665 m.s.n.m., respectivamente, lo que corrobora dicha afirmación (Tabla A.2.1.).

Según estas observaciones queda patente que en las zonas donde existe alteración hidrotermal no se puede suponer que el LSCC represente la superficie freática. Estas zonas han sido señaladas en la Figura 2.9. y en la Tabla 2.2. con azul y amarillo, indicando los puntos de medida donde se supuso la presencia de hidrotermalismo bajo el CTPV y asociado a la pared de la caldera, respectivamente. En el resto de zonas donde teóricamente no cabría esperar hidrotermalismo y en las que no se disponía de posibilidad de contrastar con datos reales se supuso que los valores asignados del LSCC se corresponden en general con la superficie freática (en verde en la Figura 2.9.).

Respecto a la estimación del LICC hay que decir que ésta fue más complicada que la del LSCC o de la superficie SPS estimada por Aubert y Kieffer (1998), ya que prácticamente no se disponía de información real con la que contrastar. El espesor promedio de la capa conductiva en el interior de la caldera, interpretada en general por Pous et al. (2002) como correspondiente a la zona saturada del acuífero de Las Cañadas, es de 700 m, pudiendo alcanzar en algunos sectores casi los 1500 m (Tabla 2.2. y Figura 2.10.). Sin embargo la existencia de hidrotermalismo a lo largo de la pared de Las Cañadas y principalmente bajo el CTPV podría enmascarar el contraste de resistividad esperado en el límite inferior de la zona saturada, sea este el límite entre materiales Pre- y Post-Cañadas o el propio "mortalón", falseando los resultados y aumentando su profundidad. Es por ello que en las zonas donde era patente la existencia de alteración hidrotermal, a la hora de reinterpretar y discretizar el LICC se optó por tomar la posición del zócalo impermeable de los datos que el CIATFE utilizó para su modelo de flujo de fluidos (SURGE, 2002) según el origen por deslizamiento lateral (valores en **negrita** en la Tabla 2.2.).

Una vez discretizados y georeferenciados todos los datos de AMT y MT de Pous et al. (2002), para comprender mejor la geometría de la zona saturada del acuífero entre las zonas donde no se disponía de información y también para determinar la distribución de las zonas de hidrotermalismo, se elaboraron otros tres nuevos perfiles concéntricos respecto al CTPV y a diferentes distancias del mismo (Figuras 2.9. y 2.11.). En estos tres perfiles, elaborados a partir de la unión de los puntos de muestreo de los diferentes perfiles originales, sólo se representó la capa conductiva que es, según Pous et al. (2002), la que tiene una resistividad inferior a 50 Ω m, y la que reviste mayor interés para el presente estudio ya que se considera que representa la zona saturada del acuífero de Las Cañadas.

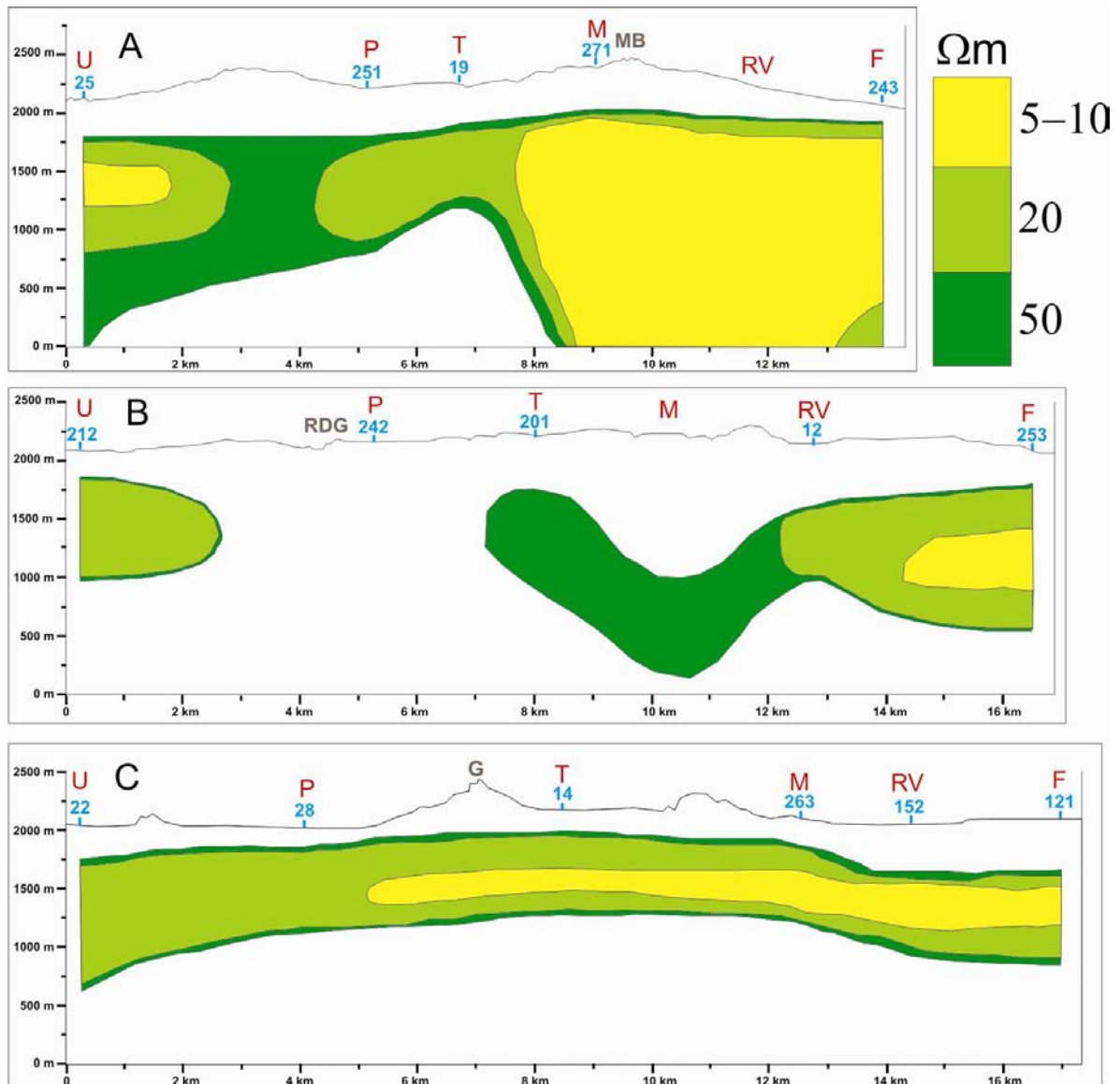


Figura 2.11. Perfiles de AMT y MT en el interior de Las Cañadas donde sólo se ha representado la capa conductiva (menor de 50 Ωm). Elaborados a partir de los datos publicados por Pous et al. (2002). Ubicación de los perfiles en la Figura 2.9., más explicación en el texto. Perfiles: U (Ucanca); P (Parador); T (Teide); M (Medio); RV (Risco Verde); F (Fortaleza). G: Guajara, RDG: Roques de García.

En el perfil A de la Figura 2.11., la morfología de la capa conductiva en el sector oriental del CTPV y hacia la Fortaleza, donde el LICC desciende hasta la cota del nivel del mar, se puede relacionar con la presencia más o menos importante de fluidos hidrotermales. El núcleo de alteración hidrotermal está sobre todo desarrollado en el sector oriental de Las Cañadas.

En el perfil B de la Figura 2.11., en el que en principio no se observan fenómenos de alteración hidrotermal, se puede ver claramente que la capa conductiva inferida en la zona occidental de Las Cañadas (zona de Ucanca) no se continúa hacia el oeste en las inmediaciones de los Roques de García (bajo el de medida 242). Este hecho probablemente indica la existencia

de algún tipo de límite estructural que a su vez posiblemente actúa como una barrera hidrogeológica, limitando considerablemente el flujo de agua subterránea a un lado y otro del mismo. La posición de dicho límite coincide, según el origen por colapso vertical (i.e. Martí y Gudmundsson, 2000), con la zona de intersección entre las calderas de Ucanca y Guajara, que se corresponde con el sector occidental y central de Las Cañadas, respectivamente (Figura 2.9.).

En el mismo perfil B, pero hacia la zona central de Las Cañadas, la morfología de la capa conductiva parece indicar la existencia de otro límite estructural en la zona del perfil Medio (punto 261) (Figura 2.9.). Éste separaría la caldera de Guajara de otra depresión situada más oriental y que coincidiría con la caldera de Diego Hernández, según un origen por colapso vertical (Martí y Gudmundsson, 2000). Según Pous et al. (2002), este límite oculto entre ambas zonas no es visible en superficie porque posiblemente está enterrado bajo los materiales de relleno del CTPV. No está clara la naturaleza de este límite estructural, que tiene la misma dirección de la Dorsal Noroeste, pero se puede interpretar que está relacionado con familias de diques radiales procedentes del CTPV y/o con el propio límite entre las calderas de colapso vertical de Guajara y Diego Hernández.

Por último, en el perfil C se observa la uniformidad de la capa conductiva a lo largo de todo el perfil como respuesta a un hidrotermalismo relativamente somero, y especialmente intenso en los sectores central y occidental de la pared.

Es importante destacar en este punto que durante el periodo de redacción de la presente tesis se han publicado al menos dos interesantes estudios geofísicos de audiomagnetotelúrica en Las Cañadas (Coppo et al., 2008a, 2008b), que pueden aportar *a priori* una nueva y valiosa información sobre la configuración del subsuelo de la caldera, y especialmente sobre la posición del zócalo impermeable en su interior. Sin embargo, el hecho de que el marcado contraste de resistividad entre la zona no saturada y la zona saturada que han detectado tanto Aubert y Kieffer (1998) como Pous et al. (2002) no haya sido detectado por Coppo et al. (2008a, 2008b), arroja algunas dudas sobre los resultados de estos trabajos. A falta de una revisión exhaustiva de los mismos en futuros estudios, aunque los datos puntuales no han sido tenidos en cuenta, sí se ha podido comprobar que hay una buena correlación con los datos de Pous et al. (2002) respecto a la posición del límite entre materiales Pre- y Post-Cañadas, infiriendo al menos tres calderas de colapso en el interior de Las Cañadas.

2.3.2. VALLE DE ICOD-LA GUANCHA

Hasta ahora la mayor parte del estudio de la reconstrucción del medio físico del acuífero de Las Cañadas se ha centrado en el área de la Caldera de Las Cañadas, que corresponde con la subzona III.0.3 (PHI, 1996), por ser la menos conocida y a la vez la más interesante, ya que posiblemente albergue el mayor volumen de reservas hídricas subterráneas

de todo Tenerife (PHI, 1996). Sin embargo, el acuífero de Las Cañadas se continúa hacia el norte a través del Valle de Icod-La Guancha hasta el mar (Figura 2.1.), el cual corresponde con las subzonas III.0.2 y III.0.1 (PHI, 1996). En este valle, que según todos los autores tiene un origen por deslizamiento lateral (i.e. Navarro y Coello, 1989; Ancochea et al., 1990, 1999; Watts y Mason, 2001), existen muchas más galerías y pozos que en el área la Caldera de Las Cañadas, permitiendo estimar con mayor precisión tanto la morfología del zócalo impermeable como la posición y evolución de la superficie freática. En esta región del acuífero, y en base a la experiencia adquirida en los trabajos de perforación de las galerías, el zócalo impermeable se corresponde casi siempre con el depósito brechoide de matriz arcillosa conocido como "mortalón", y el nivel freático normalmente se sitúa justo por encima de él, en los materiales jóvenes y permeables de la Serie Post-Cañadas que rellenan todo el valle, a veces con espesores de más de 500 m (Navarro, 1995; Carracedo et al., 2007a). Esta observación sugiere que la zona saturada del acuífero no tiene gran espesor en esta región.

La continuación submarina del Valle de Icod-La Guancha ha sido estudiada y caracterizada relativamente bien a través de los estudios de sónar realizados en los fondos marinos al norte de Tenerife (i.e. Watts y Masson, 2001; Masson et al., 2002). Estos estudios concluyen que la configuración (pendiente, volúmenes, etc.), tanto de la parte sumergida como emergida de dicho valle, se corresponden con un deslizamiento lateral cuya cabecera se situaría cerca de la actual pared de la Caldera de Las Cañadas. Respecto a la parte emergida del Valle de Icod-La Guancha, Márquez et al. (2008) han llevado a cabo un estudio de detalle de las galerías, pozos y sondeos del acuífero de Las Cañadas, determinando en cada obra de captación de la que se disponía información si corta o no el "mortalón" y, en el caso que fuera posible, a qué cota lo cortaba. Para poder trazar la morfología del "mortalón" en las zonas donde no se disponía de información, Márquez et al. (2008) tomaron la pendiente de la parte submarina del deslizamiento según los estudios de Watts y Masson (2001) y la extrapolaron hasta la base del CTPV (línea azul punteada en la Figura 2.12.).

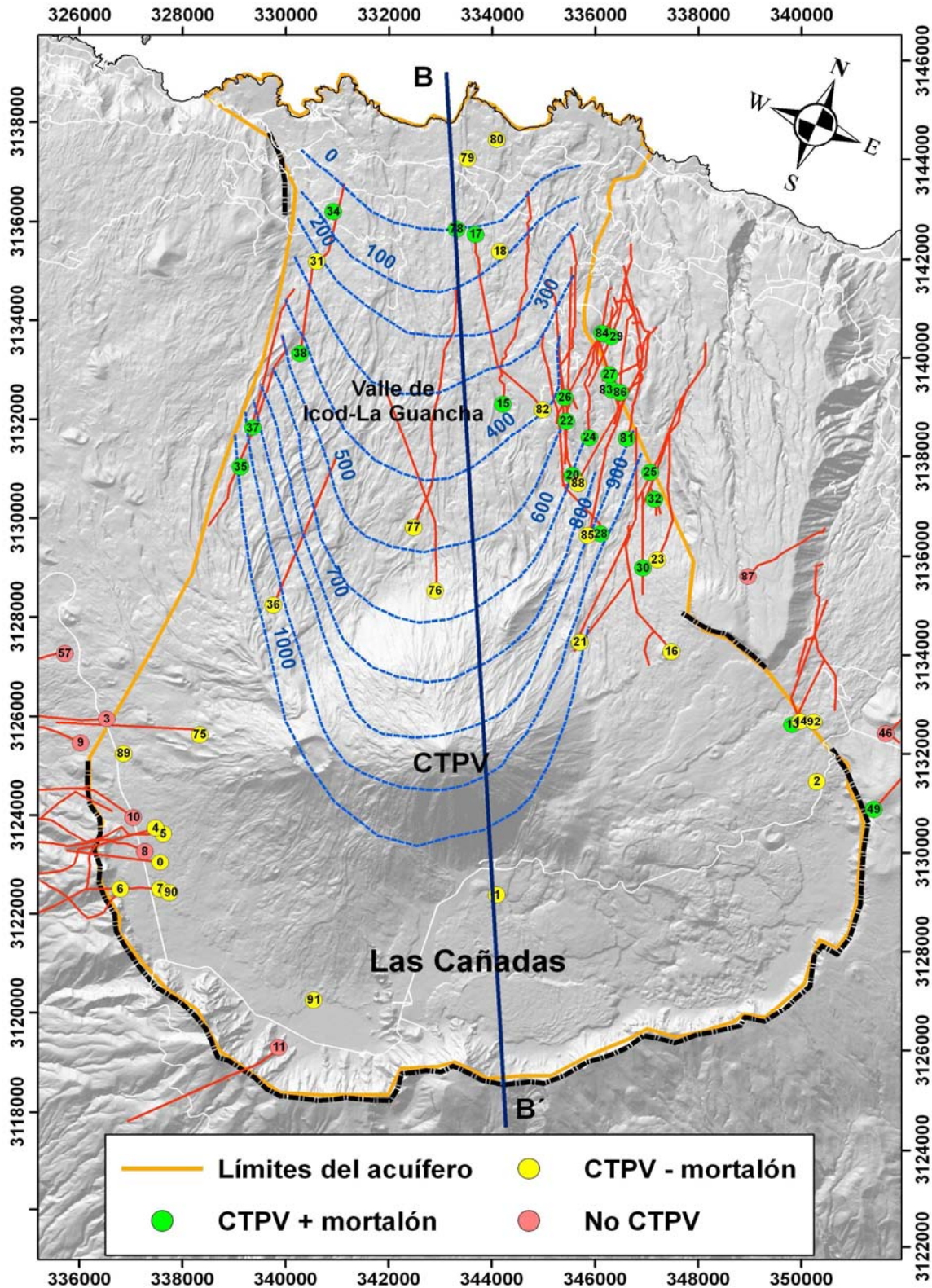


Figura 2.12. Mapa de sombras del acuífero de Las Cañadas, con las galerías, pozos y sondeos utilizados para la reconstrucción de la geometría de la zona saturada (los números se corresponden con los de la Tabla A.2.1.). Círculos verdes: atraviesan materiales del Complejo Teide-Pico Viejo (CTPV) y "mortalón"; círculos amarillos: atraviesan CTPV sin observarse "mortalón"; círculos rosados: no atraviesan CTPV. Línea azul discontinua: morfología del "mortalón" según Márquez et al. (2008); línea azul continua: trazado del corte de la Figura 2.13.; línea negra: escarpes visibles de la pared de la caldera. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

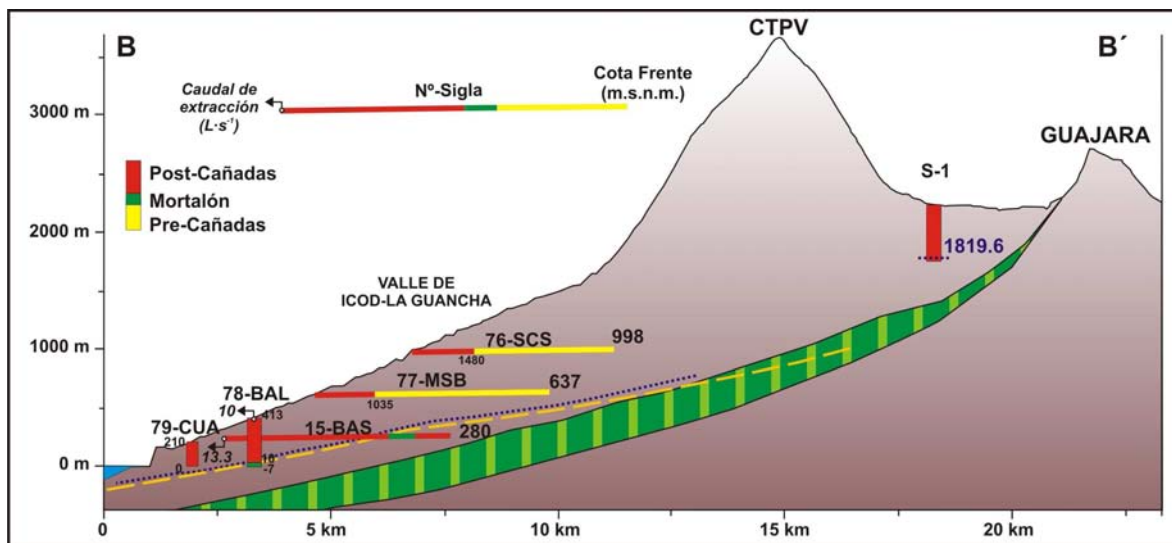


Figura 2.13. Corte hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas, desde Guajara hasta la costa del Valle de Icod-La Guancha. Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte: línea azul en la Figura 2.12.

Tabla 2.4. Resumen de las características de las galerías (G) y pozos (P), representados en la Figura 2.13. Las características del sondeo de investigación S-1 ya fueron descritas en la Tabla 2.1. Las coordenadas X e Y son longitud y latitud (en metros) respectivamente y están referenciadas a la entrada o boca de la galería. También se incluyen los datos de Z (altitud), en m.s.n.m., de la boca o entrada (BC) y del frente (FR) o zona más profunda de cada galería o sondeo. En el caso de las galerías, el Z FR representado fue calculado teniendo en cuenta la longitud (Long.) de cada una (contando solo la galería principal, sin ramales) y que todas ellas suelen estar excavadas con una pendiente positiva de alrededor de 5:1000 (Coello, 1973).

Nº	Sigla	T	X UTM (m)	Y UTM (m)	Z BC	Z FR	Long. / Prof. (m)	Pre-Cañadas	Post-Cañadas	Cota Mortalón (profundidad)
76	SCS	G	334789	3135357	975	998	4620	(1480-4620)	(0-1480)	No
77	MSB	G	335359	3137937	610	637	5400	(1035-5269**)	(0-1035)	No
15	BAS	G	335949	3140447	255	280	4949		0-3825 y 4228-4538*	270 m.s.n.m. (3825-4228)
78	BAL	P	334889	3139132	413	-7	420		0-403	10 m.s.n.m. (403-420)
79	CUA	P	334524	3140632	210	0	210		0-210	No

En el corte hidrogeológico de la Figura 2.13. se ha reproducido la litología simplificada de tres galerías (Nº 76, 77 y 15) y de dos pozos del sector central del Valle de Icod-La Guancha (Nº 79 y 79), así como del sondeo Nº 1 (S-1) en el interior de la Caldera de Las Cañadas. En función de las descripciones litológicas extraídas de las fichas del CIATFE, se ha tratado de diferenciar en cada una de estas obras de captación entre materiales Pre-Cañadas y Post-Cañadas, e incluso se ha indicado el corte con el "mortalón" cuando se ha producido.

En la Figura 2.13 también se ha dibujado con una línea naranja discontinua la superficie descrita por Márquez et al. (2008) del techo del "mortalón", junto al depósito del "mortalón" (franja a rayas verdes) elaborada por Watts y Masson (2001), a partir del estudio de la parte sumergida del Valle de Icod-La Guancha. Respecto a la primera superficie, se puede observar claramente que se correlaciona muy bien con la galería Nº 15 (BAS) y con los pozos Nº 78 (BAL) y 79 (CUA), porque mientras las dos primeras obras de captación cortan el "mortalón" a 270 y 10 m.s.n.m., respectivamente, el último pozo no lo alcanza (Figura 2.13 y

Tabla 2.4.). Por el contrario, la posición del "mortalón" según Watts y Masson (2001) es algo más profunda que la de Márquez et al. (2008), y no se correlaciona con los datos de las galerías y pozos representados. Aunque en el Valle de Icod-La Guancha ambas poseen la misma pendiente, en esta última va aumentando a medida que se acerca a la cabecera del deslizamiento lateral, teóricamente situado bajo la pared de Las Cañadas, al mismo tiempo que el depósito va disminuyendo su espesor.

En función de las descripciones litológicas de las galerías Nº 76 (SCS) y 77 (MSB) en las fichas del CIATFE, ambas galerías penetran en la Serie Pre-Cañadas desde los 1480 y 1035 m de la bocamina, respectivamente, hasta el frente y sin atravesar el "mortalón" (Tabla 2.4). Sin embargo, considerando las morfologías del zócalo impermeable tanto de Watts y Masson (2001) como la de Márquez et al. (2008), representada en la Figura 2.13., es muy probable que la interpretación litológica de estas dos galerías sea incorrecta y que no corten en ningún momento los materiales Pre-Cañadas, siendo así como se ha interpretado en la presente tesis.

El estudio de los caudales extraídos por cada obra de captación en la Figura 2.13. ayudó también a determinar la morfología de la superficie freática y del zócalo impermeable. Mientras las galerías Nº 76 (SCS) y 77 (MSB) y el pozo Nº 79 (CUA) están secos porque quedaron situados por encima del nivel freático, la galería Nº 15 (BAS) y el pozo Nº 78 (BAL) extraen un caudal apreciable, de 13.3 y 10 L·s⁻¹, respectivamente. Por tanto, el nivel freático y el zócalo impermeable deben estar como mínimo por debajo del frente de cada galería y de cada pozo seco. Es importante destacar que en la galería Nº 15 (BAS), tras atravesar el "mortalón" se vuelven a perforar materiales de la Serie Post-Cañadas, en vez de los de la Serie Pre-Cañadas como cabría esperar. La interpretación litológica posiblemente es correcta porque la mayor parte del agua que se drena, según el informe del CIATFE, proviene de los materiales Post-Cañadas una vez atravesado el "mortalón", por lo que se entiende que es muy probable que aquí el "mortalón" haga una especie de pliegue. Esta morfología irregular del "mortalón" también ha sido observada en la galería Nº 30 (VE2) donde tras cortar el "mortalón" a 1325 m.s.n.m. (Figura 2.12., según Márquez et al., 2008) también se pasa de nuevo a materiales Post-Cañadas (A. Márquez, comunicación personal). Por tanto, aunque en la galería Nº 15 (BAS) el "mortalón" es cortado entre los 3825 y los 4228 m. de distancia de la bocamina, el teórico zócalo impermeable ha sido situado por debajo de la cota del frente (280 m.s.n.m., Tabla 2.4.). Este hecho indica que el zócalo impermeable en el Valle de Icod-La Guancha, que en teoría se relaciona con la posición del "mortalón", tampoco es una superficie plana, al igual que en Las Cañadas, sino que presenta irregularidades importantes que hay que tener en cuenta a la hora de reconstruir el modelo físico.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez recopilada, discretizada, georeferenciada e interpretada toda la información procedente de los diversos sondeos de investigación, galerías, pozos y estudios geofísicos, sobre la geometría de la zona saturada del acuífero de Las Cañadas, se ha tratado de combinar todos los datos construyendo un modelo de la geometría y características del acuífero de Las Cañadas que sea consistente con los estudios mencionados.

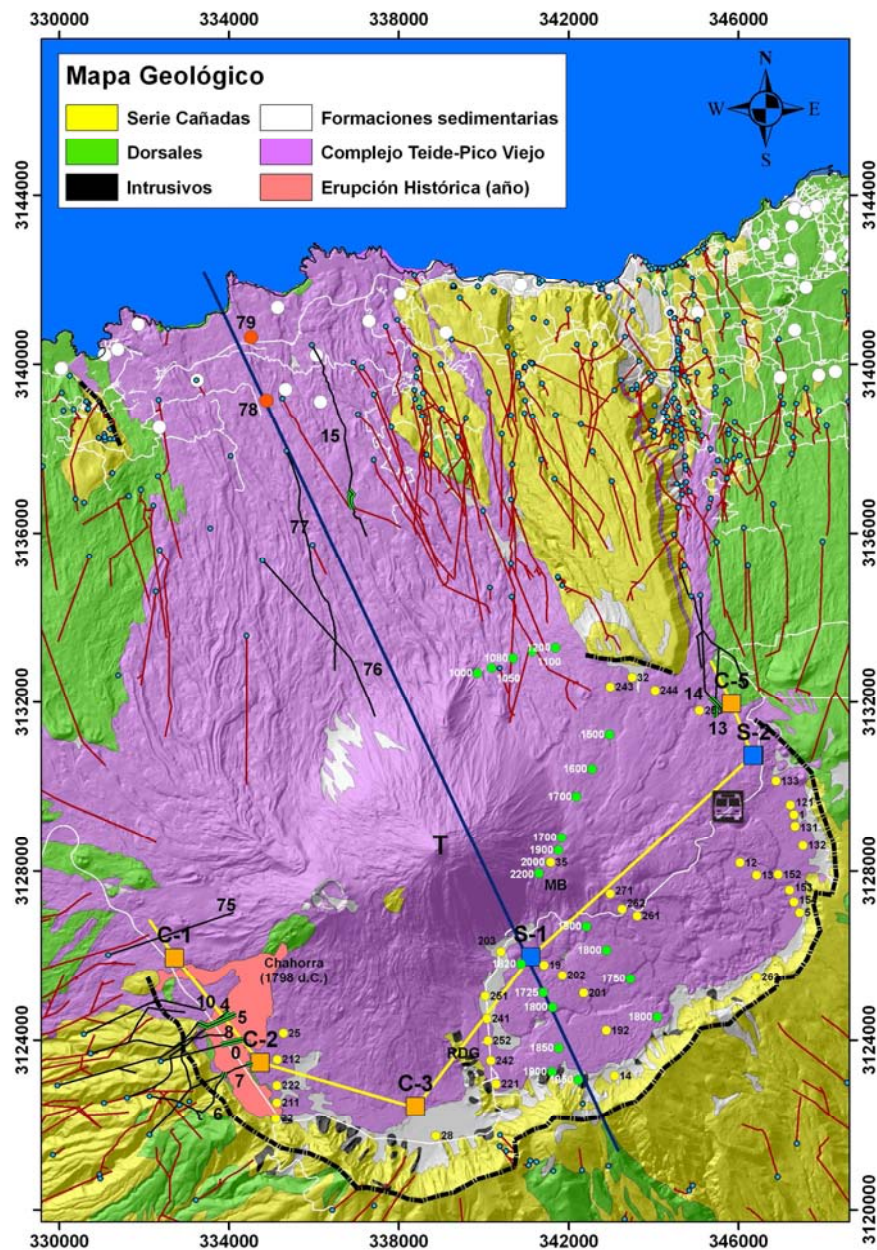


Figura 2.14. Mapa geológico de Las Cañadas donde se han representado los cortes hidrogeológicos de las Figuras 2.15. (línea amarilla) y 2.16. (línea azul). También se han incluido los puntos de medida de los estudios de geofísica de Aubert y Kieffer (1998) y Pous et al. (2002) (círculos verdes y amarillos, respectivamente) junto a las galerías (líneas negras y rojas) y pozos (círculos blancos y naranjas) del área de estudio así como los 6 sondeos de investigación perforados en Las Cañadas (cuadrados naranjas y azules). T: Teide; MB: Montaña Blanca. Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

2.4.1. CALDERA DE LAS CAÑADAS

En la Figura 2.15. se ha representado a través de un corte hidrogeológico la litología simplificada de los sondeos de investigación de Las Cañadas, diferenciando, según lo visto en la sección 2.3.1.1. del presente capítulo, entre materiales de la Serie Pre-Cañadas y de la Serie Post-Cañadas. También se han incluido las diferentes cotas inferidas de la superficie SPS (en verde) y del LSCC (en azul) procedentes de los puntos de medida próximos al corte hidrogeológico de los estudios geofísicos de Aubert y Kieffer (1998) y Pous et al. (2002), respectivamente, así como la cota del nivel piezométrico aportada por los sondeos de investigación (línea azul marino) en el momento final de su perforación, y la información procedente de las galerías que penetran en Las Cañadas desde la periferia de los sectores occidental (Chasogo) y oriental (El Portillo).

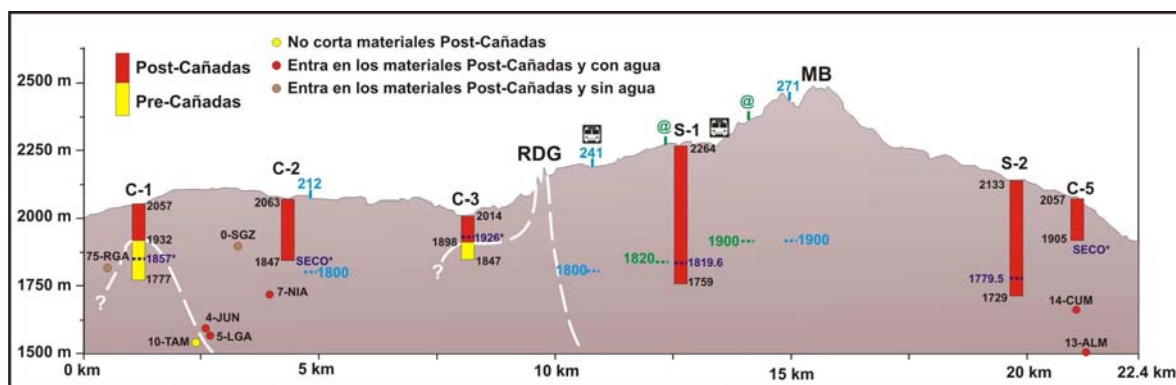


Figura 2.15 Corte hidrogeológico de Las Cañadas a través de los 6 sondeos de investigación junto a la intersección con las galerías procedentes de la periferia de Las Cañadas (círculos) e información de los estudios geofísicos de Aubert y Kieffer (1998) y de Pous et al. (2002). RDG: Roques de García; MB: Montaña Blanca. Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte: línea amarilla en la Figura 2.14.

Para extrapolar la morfología del zócalo impermeable inferido en el sector occidental de Las Cañadas no sólo hay que tener en cuenta que los dos únicos sondeos que cortan materiales Pre-Cañadas son el C-1 y el C-3 a 1932 y 1898 m.s.n.m., respectivamente, sino también la información procedente de las galerías que penetran en Las Cañadas desde el exterior en el tramo Boca Tauce-Chasogo (Figura 2.14.). Para satisfacer todas las condiciones es necesario que dicho límite (representado por una línea blanca discontinua en la Figura 2.15.) se profundice drásticamente bajo el sondeo C-2, ya que las galerías Nº 4 (JUN) y Nº 5 (LGA) cortan los materiales Post-Cañadas a 1592 y 1564 m.s.n.m. respectivamente (Tabla 2.2.). Al norte del sondeo C-3, el límite entre los materiales Pre- y Post-Cañadas también debe situarse por debajo de la galería Nº 75 (RGA), ya que a la altura de la intersección con el corte hidrogeológico (1825 m.s.n.m. aproximadamente) esta galería se encuentra en materiales del relleno de la caldera (Figura 2.14.). Según esta configuración y dada su proximidad a la pared de la caldera, el sondeo C-1 puede que esté situado sobre un saliente o espolón de dicha pared.

Otra posibilidad es que esté relacionado con el límite norte de la caldera de Ucanca (Martí y Gudmundsson, 2000), pero teniendo en cuenta que la galería Nº 75 (RGA) corta entre los 750 y los 820 m de distancia de la bocamina (I. Farrujia, comunicación personal) la continuación oculta inferida de la pared de Las Cañadas hacia el norte (Navarro, 1995), esta última posibilidad quedaría prácticamente descartada. Por último, si se supone que los Roques de García (RDG) son materiales de la Serie Pre-Cañadas (Galindo et al., 2005), el límite entre éstos y la Serie Post-Cañadas hacia el sondeo C-3 posiblemente se encuentre a cotas muy someras.

La presencia en el sondeo C-1 del nivel piezométrico en los materiales Pre-Cañadas (a 1857 m.s.n.m.) cuando se terminó de perforar en el año 1975, indicaría que el acuífero de Las Cañadas, al menos en este punto, no es un acuífero colgado.

En los sectores central y oriental de la Caldera de Las Cañadas, la posición del contacto entre los materiales de la Serie Pre- y Post-Cañadas no se ha podido determinar a partir de los tres sondeos de investigación (S-1, S-2 ó C-5) ya que ninguno lo intercepta, según las columnas litológicas estudiadas de cada uno de ellos (Figura 2.25.). No obstante, existen dos galerías Nº 13 (ALM) y 14 (CUM), procedentes del Valle de La Orotava que penetran en el relleno de la caldera (Figura 2.14.), y cuyos frentes están, como se dijo anteriormente, a 1660 y 1475 m.s.n.m. respectivamente, justo debajo del sondeo de investigación C-5. La galería Nº 14 (CUM) no ha podido ser visitada desde hace décadas porque está tapiada la entrada y, por tanto, no se sabe a qué profundidad penetra en los materiales de relleno (Navarro, 1995), pero uno de los ramales de la galería Nº 13 (ALM) corta 20 m antes del frente (a 3970 m de la bocamina aproximadamente) unos depósitos brechoides impermeables que posiblemente representen el "mortalón" del deslizamiento de Icod-La Guancha, para luego penetrar en los materiales de relleno Post-Cañadas (I. Farrujia, comunicación personal). Esta información, junto a la cota del nivel piezométrico en el cercano sondeo Nº 2 (S-2) (entre 1780 y 1754 m.s.n.m.) indica que la zona saturada del acuífero de Las Cañadas tiene en este punto al menos un espesor de 300 m (Farrujia et al., 2004).

Con todos los datos procedentes de los estudios geofísicos se ha podido estimar aproximadamente la morfología del zócalo impermeable inferido, delimitando a su vez un núcleo de alteración hidrotermal bajo el CTPV. Este núcleo de alteración hidrotermal bajo el CTPV y/o la densa red de diques que se intruyeron debajo del mismo, posiblemente actúan como barreras al flujo de agua subterránea, limitando la descarga de agua hacia el norte y favoreciendo la sobre elevación del nivel freático del acuífero en el interior de la Caldera de Las Cañadas, tal y como se ha comprobado tanto por las galerías que penetran en el anfiteatro desde las áreas periféricas como por los sondeos de investigación Nº 1 (S-1) y 2 (S-2) del CIATFE (Farrujia et al., 2001a, 2001b, 2004) (Figura 2.15.).

Diversos estudios en ambientes volcánicos similares a Las Cañadas (i.e. en la isla Reunión, ver Courteaud et al., 1997), la alteración hidrotermal transforma en arcillas a las rocas y deposita minerales secundarios en poros y fisuras, disminuyendo considerablemente así la permeabilidad de la roca afectada por dicho fenómeno.

Por último, se ha detectado a partir de los datos geofísicos la presencia de dos posibles límites estructurales que delimitan al este y al oeste la teórica caldera de colapso de Guajara y que es probable que también actúen como barreras hidrogeológicas, condicionando el flujo de agua subterránea en el interior de la Caldera de Las Cañadas.

2.4.2. VALLE DE ICOD-LA GUANCHA

Para la reconstrucción del zócalo en el Valle de Icod-La Guancha, en la presente tesis se ha revisado, georeferenciado y luego implementado en el modelo físico de todo el acuífero de Las Cañadas, la información de las fichas del CIATFE, de los estudios de Navarro (1995), Watts y Masson (2001) y Márquez et al. (2008), junto a todos los datos procedentes del área de la Caldera de Las Cañadas mencionados en el apartado anterior (ver Figura 2.12.).

Finalmente se han elaborado varios cortes hidrogeológicos para contrastar y validar toda la información. Tomando como ejemplo el mismo corte que el de la Figura 2.13., que atraviesa el acuífero en dirección NNO-SSE, se ha representado con una línea blanca rayada la configuración final del zócalo impermeable en la zona del Valle de Icod-La Guancha y bajo el CTPV (Figura 2.16.). En la zona de la caldera junto al sondeo N°1 se han representado los puntos de medida del estudio geofísico de Pous et al. (2002), junto a las diferentes cotas del LSCC (línea azul punteada) y del LICC (línea blanca punteada). Como se puede observar en la Figura 2.16., a diferencia de la Figura 2.13. original, las galerías N° 76 (SCS) y 77 (MSB) ya han sido representadas con la interpretación litológica correcta, indicando que sólo atraviesan materiales de la Serie Post-Cañadas.

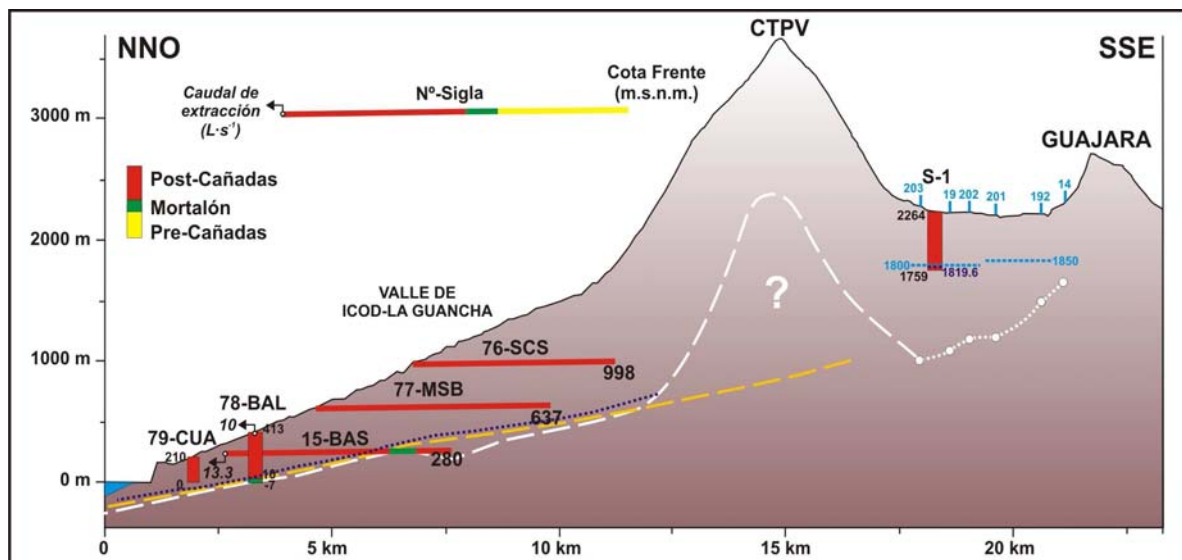


Figura 2.16. Corte hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas, modificado de la Figura 2.13., junto a los datos de los estudios de Pous et al. (2002) y Márquez et al. (2008), y la configuración final del zócalo impermeable (línea blanca rayada). Ver más explicación en el texto. Ubicación del corte en figura 2.14.

Mientras la morfología del zócalo inferida del estudio de Márquez et al. (2008) se mantiene con una pendiente relativamente constante en todo el Valle de Icod-La Guancha y bajo el CTPV (línea naranja discontinua), la configuración final estimada en la presente tesis (línea blanca discontinua) se adapta a las diferentes particularidades observadas en el Valle de Icod-La Guancha, como la de la galería Nº 15 (BAS), y aumenta bruscamente bajo el CTPV, emulando el núcleo de alteración hidrotermal identificado anteriormente y que representa una zona de baja permeabilidad en el límite inferior del acuífero en esa zona. Como se puede observar en la Figura 2.16., en el estudio de Márquez et al. (2008) sólo se ha extrapolado el "mortalón" hasta los 1000 m.s.n.m. de cota, que se sitúa bajo el CTPV, pero a menos de un kilómetro hacia el sur está el punto de medida 203 del estudio geofísico de Pous et al. (2002) en el que el zócalo (LICC) fue estimado también a los 1000 m.s.n.m. (Tabla 2.3.). Por tanto, aunque en el estudio de Márquez et al. (2008) se apoya con sus datos la hipótesis del deslizamiento lateral para el origen de Las Cañadas, los datos geofísicos de Pous et al. (2002), en los que se identifican varias calderas de colapso vertical, se correlacionan también con los primeros. Este hecho, por un lado pone de manifiesto que la configuración del zócalo inferida por Márquez et al. (2008) no implica necesariamente un origen por deslizamiento lateral para la Caldera de Las Cañadas, y por otro confirma la validez de la reconstrucción del medio físico del acuífero de Las Cañadas de la presente tesis, al menos en la zona central del Valle de Icod-La Guancha y en las inmediaciones del sondeo de investigación S-1.

2.4.3. CONEXIÓN CON LOS MATERIALES PRE-CAÑADAS SUBYACENTES

El marcado contraste existente de las características hidrogeológicas (porosidad y permeabilidad, principalmente) entre los materiales Pre-Cañadas y Post-Cañadas ha permitido considerar al límite inferior entre ambas formaciones, exista o no "mortalón", y al núcleo de alteración hidrotermal bajo el Complejo Teide-Pico Viejo, como el zócalo teóricamente impermeable del acuífero de Las Cañadas. No obstante, la presencia en el sondeo C-1 del nivel piezométrico en los materiales Pre-Cañadas subyacentes (a 1857 m.s.n.m.) cuando se terminó de perforar en el año 1975 (Figura 2.5.), obliga a plantear qué tipo de conexión hidráulica existe entre el acuífero de Las Cañadas y los materiales Pre-Cañadas subyacentes.

Los pocos datos que se poseen sobre las características hidrogeológicas de los materiales Pre-Cañadas subyacentes en el interior de la caldera indican que éstos en general poseen una permeabilidad muy reducida, como queda patente en la galería Nº 8 (RBO); aunque en zonas donde la fracturación secundaria es importante, como en los dominios próximos a la Dorsal Noroeste debido a la intrusión de diques (Galindo, 2005), puede aumentar considerablemente su permeabilidad produciéndose algunas transferencias de agua del acuífero hacia los sectores circundantes, como los observados en las galerías Nº 3 (HLA) ó 39 (MA1) (Navarro, 1995).

En el Valle de Icod-La Guancha, con la información disponible hasta la fecha no hay constancia de ninguna galería o pozo que haya atravesado completamente el "mortalón" y

alcanzado los materiales Pre-Cañadas subyacentes. En general, todas las obras de captación alcanzan la zona saturada unos pocos cientos de metros por encima del "mortalón", tras el cual la temperatura en el interior de la galería aumenta considerablemente hasta los 40 °C (Navarro, 1995). Por tanto, aunque no se conoce con precisión el estado de saturación o la permeabilidad de los materiales subyacentes, se puede considerar que en ambos casos es muy reducida y que la conexión hidráulica con el acuífero de Las Cañadas es despreciable a efectos del funcionamiento hidrogeológico general.

2.4.4. DIQUES

Los diques son una discontinuidad bidimensional en el medio poroso y representan uno de los factores más importantes de la anisotropía macroscópica de la permeabilidad de los terrenos volcánicos ya que, en función de si la dirección del flujo es paralela o perpendicular pueden actuar como barreras prácticamente impermeables o como zonas de circulación preferente de las aguas subterráneas (Custodio, 1988; Custodio y Llamas, 1976; 1983). Esta propiedad permite que en las zonas donde la intrusión de diques es importante, como en las cabeceras de las dorsales de Tenerife, el flujo en dirección perpendicular, a ellos (dirección cumbre-mar normalmente) se vea limitado considerablemente, favoreciendo la acumulación de recursos y la consecuente sobre elevación del nivel freático (PHI, 1996) (ver Figura 1.26.). Por tanto, para la correcta caracterización del medio poroso del acuífero de Las Cañadas ha sido importante revisar la información disponible sobre la existencia de diques y sobre su posible influencia en la circulación del agua subterránea.

Tal y como se ha comentado en el capítulo 1 de la presente tesis, hay diversos estudios que indican que en la Caldera de Las Cañadas existen varias redes de diques con distintos patrones de distribución: radiales asociados al CTPV, concéntricos y cónicos relacionados con las calderas de colapso del Edificio Cañadas y con direcciones NE-SO y NO-SE asociados a las dorsales Noreste y Noroeste en el sector oriental y occidental de la caldera, respectivamente (Navarro, 1995; Martí y Gudmunsson, 2000; Galindo, 2005). Mientras que en algunas zonas de las dorsales (especialmente en la Dorsal Noreste) los diques son visibles en superficie (Galindo, 2005) (figura 1.28), en otras ocasiones la presencia de estos diques ha sido puesta de manifiesto a través de las visitas realizadas a las galerías (Coello, 1973; Navarro, 1995).

Para el presente trabajo se ha inferido la posible existencia de diques en el subsuelo suponiendo que los alineamientos de los centros eruptivos de la superficie del CTPV y de la Caldera de Las Cañadas pueden estar relacionados en profundidad con la presencia de diques con la misma dirección (Galindo, 2005). En la Figura 2.17. se han representado los centros eruptivos visibles actualmente, infiriendo a partir de diversos estudios, los posibles alineamientos volcánicos en superficie (Coello y Bravo, 1989; Navarro, 1995; Ablay y Martí, 2000). Como se puede observar a través de la distribución de los centros eruptivos, el control volcano-estructural de la dorsal Noroeste es muy patente en el sector occidental de la Caldera

de Las Cañadas, mientras que en el sector oriental el control de la Dorsal Noreste es mucho más difuso, tal y como sugiere Navarro (1995).

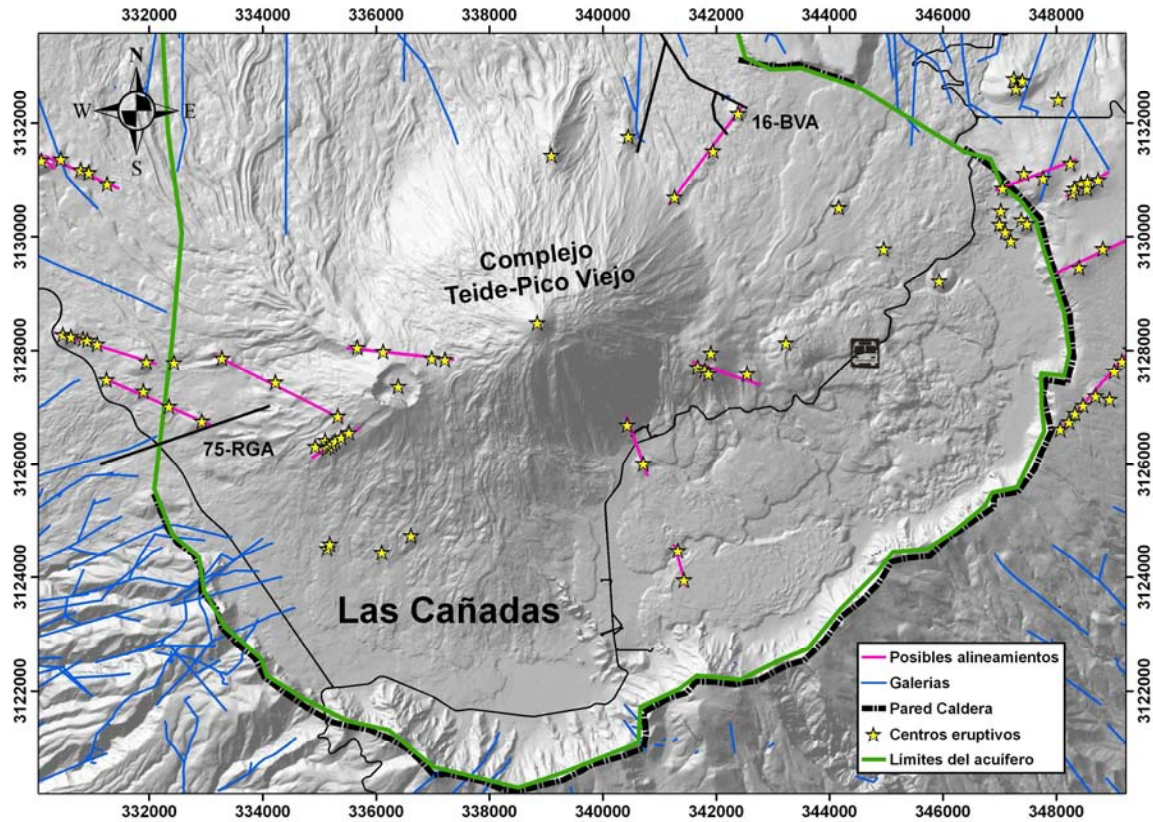


Figura 2.17. Centros eruptivos y posibles alineamientos volcánicos en la Caldera de Las Cañadas, junto a las galerías de la zona. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

A partir de los datos geológicos procedentes de las galerías se ha tratado de correlacionar los alineamientos volcánicos representados en superficie con la presencia de diques en el subsuelo. Para ello se han revisado las fichas de las galerías en las que potencialmente puede observarse esta correlación, que eran principalmente las galerías Nº 16 (BVA) y 75 (RGA). Respecto a la galería Nº 16 (BVA), aunque el frente del ramal principal coincide en superficie con un posible alineamiento volcánico (Figura 2.17.), en la ficha de la galería del CIATFE no consta que corte ni un solo dique a lo largo de toda la traza de la misma. A lo largo de la presente tesis se trató de visitar sin éxito dicha galería en varias ocasiones para comprobar *in situ* la existencia de diques; pero, debido a la continua emisión de gases, en ninguna de las ocasiones fue posible entrar. Respecto a la galería Nº 75 (RGA), los técnicos del CIATFE han podido visitarla y han constatado la presencia de varios diques a partir de los 2000 m de distancia de la bocamina (I. Farrujia, comunicación personal), coincidiendo razonablemente bien con el alineamiento volcánico en superficie.

Por tanto, con la información disponible hasta el momento de redactar la presente tesis, al menos hasta el frente de los diferentes ramales de la galería Nº 16 (BVA) no se tiene constancia de ningún dique, mientras que en la zona de la galería Nº 75 (RGA) sí se ha inferido

la existencia de una familia de diques en dirección NO-SE que potencialmente pueden afectar a la circulación del agua subterránea desde el sector occidental de Las Cañadas hacia el Valle de Icod-La Guancha, derivándola parcialmente hacia la Dorsal Noroeste.

Por último, aunque no existen galerías ni pozos bajo el CTPV que permitan corroborar la presencia de diques en su interior, muy posiblemente exista una densa red de diques que alimentaron las continuas erupciones que ha tenido desde su formación hace aproximadamente 200 ka (Carracedo et al., 2007a). Esta red de diques, cuyas dimensiones se han supuesto como mínimo similares a las del núcleo de alteración hidrotermal deducido con métodos geofísicos, posiblemente también representa una barrera al flujo del agua subterránea desde la Caldera de Las Cañadas hacia el Valle de Icod-La Guancha (Navarro, 1995).

2.4.5. MODELO FÍSICO FINAL

Finalmente con todos los resultados obtenidos a lo largo del presente capítulo se ha elaborado un modelo físico final del acuífero de Las Cañadas. En la Figura 2.18. se han representado las principales características del modelo en el área de la Caldera de Las Cañadas y en el Valle de Icod-La Guancha. En dicha figura se muestran los tres límites volcano-estructurales inferidos a tenor de los diferentes estudios geofísicos y por la información procedente de las galerías, pozos y sondeos. En el sentido contrario a las agujas del reloj son: los diques de la Dorsal Noroeste, que se prolongan hacia el interior de la Caldera; la zona al este de los Roques de García y prácticamente paralela a los mismos; el límite oculto que parte desde La Angostura hacia Montaña Blanca (MB) con dirección NO-SE. Los diques de la Dorsal Noroeste, posiblemente deriven parte del agua subterránea que circula en dirección al Valle de Icod-La Guancha hacia el dominio de la Dorsal Noroeste, mientras que los otros dos también limitan la circulación del agua subterránea entre las diferentes zonas en el interior de la Caldera de Las Cañadas, justificando así la diferencia de cota del nivel freático inferida con los estudios geofísicos y observada en los sondeos de investigación Nº 1 y 2 (Figura 2.6.)

Respecto al zócalo impermeable del acuífero de Las Cañadas, está conformado en el Valle de Icod-La Guancha por el "mortalón", en el área de la Caldera por los materiales de la Serie Pre-Cañadas y bajo el CTPV por el núcleo de alteración hidrotermal y la densa red de diques asociada. Las dimensiones aproximadas del núcleo de alteración hidrotermal propuesto en la presente tesis (línea malva discontinua) se han obtenido a partir de los estudios geofísicos de Aubert y Kieffer (1998) y de Pous et al. (2002). Si bien en ambos trabajos el hidrotermalismo queda patente en la zona de Montaña Blanca, la observación de hidrotermalismo en el punto de medida número 25, en el sector occidental de Las Cañadas (Figura 2.9.), indica que es muy probable que el núcleo de alteración hidrotermal se extienda también bajo el resto del CTPV. En el caso de ser así, posiblemente este núcleo de alteración hidrotermal y la densa red de diques asociada también limiten el flujo de agua subterránea desde la Caldera de Las Cañadas hacia el Valle de Icod-La Guancha.

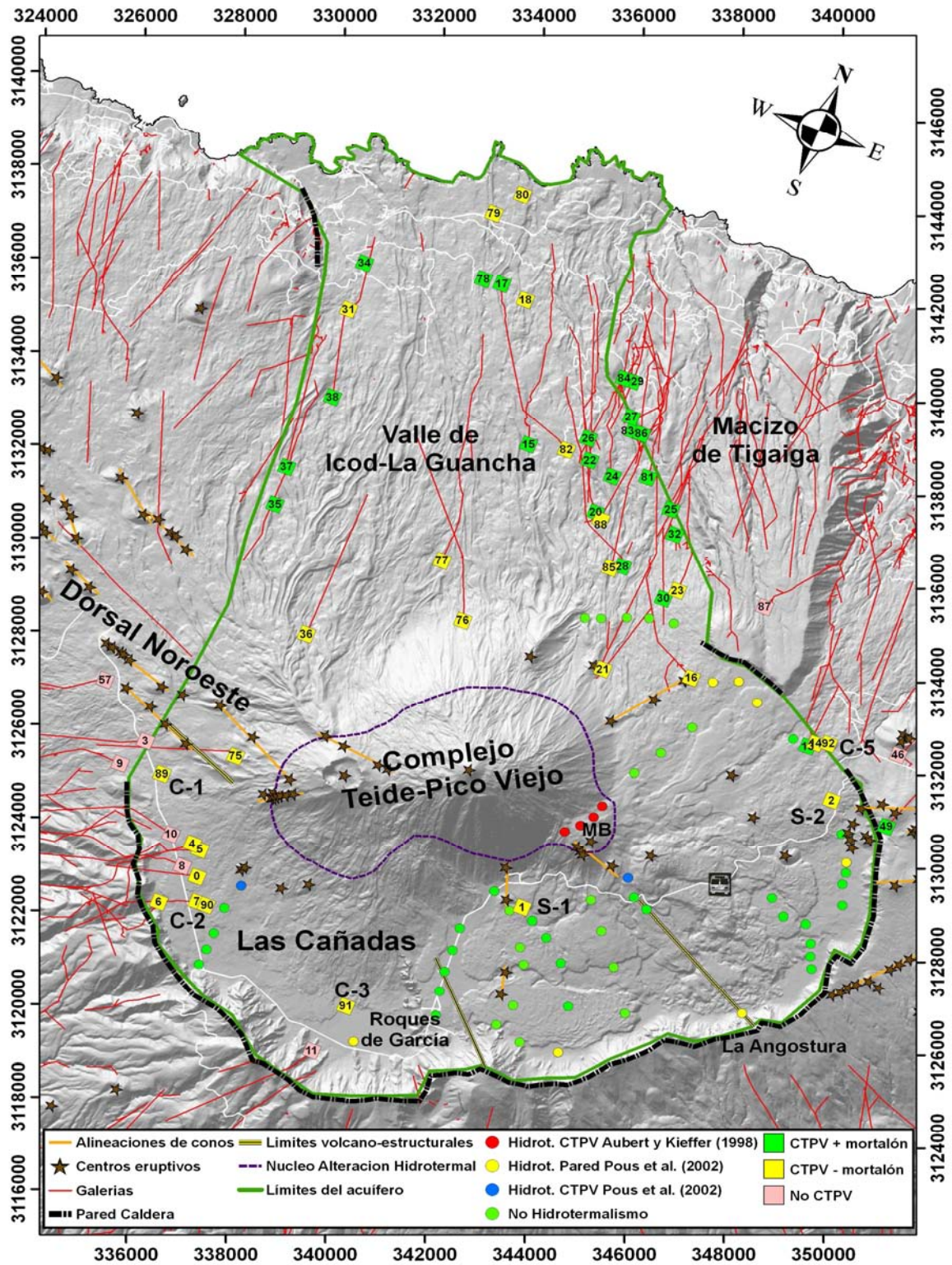


Figura 2.18. Mapa del acuífero de Las Cañadas donde se han representado las principales características del modelo físico final. Ver más explicación en el texto. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

3.1. INTRODUCCIÓN

La caracterización química e isotópica de las precipitaciones es una herramienta fundamental en cualquier estudio hidrológico para avanzar en el conocimiento de la recarga y para modelar geoquímicamente los procesos que tienen lugar en los acuíferos (Gasparini et al., 1990; Aiuppa et al., 2001; Scholl et al., 1996; Alcalá y Custodio, 2004, 2005, 2007 y 2008; D'Alessandro et al., 2004; Hildebrand et al., 2005; Demlie et al., 2007; Custodio, 2009a, 2009b).

Las precipitaciones, origen esencial de las aguas subterráneas, son un vehículo primario de gran importancia en el aporte de sales solubles y en comunicar cierta agresividad al agua de infiltración (Drever, 1997). La composición química de la precipitación atmosférica es el principal factor del componente climático de la composición química promedio de las aguas subterráneas (Custodio, 1997). Por tanto, las características químicas (e isotópicas) de las aguas subterráneas dependen, en parte, de las propias del agua de lluvia y del clima de la zona (Custodio, 1991). El conocimiento de la composición química de la precipitación atmosférica es esencial también para establecer estimaciones de la recarga promedio a los acuíferos a partir del balance químico de sustancias conservativas, como el ión cloruro, procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Eriksson y Khunakasem, 1969).

La composición química de las precipitaciones no es H₂O puro sino que contiene un amplio rango de sustancias disueltas cuya concentración varía considerablemente en función de la distancia al mar, la velocidad del viento, la intensidad de precipitación y momento y ambiente de muestreo, entre otros factores (i.e. Drever, 1997). La precipitación presenta una cierta cantidad de sales disueltas procedentes del aerosol marino que se disuelve en el agua de lluvia, tanto por lixiviado de la deposición seca sobre el terreno como por interacción con las partículas solubles del mar presentes en la atmósfera en suspensión (Custodio, 1991, 2009a).

Otra fuente de sales en el agua de lluvia es la fracción de polvo atmosférico en la deposición seca, especialmente el local o, en el caso de las Islas Canarias, el polvo atmosférico en suspensión procedente del Sáhara (fenómeno conocido localmente como "calima"). Según Criado y Dorta (2003), la composición química de este polvo procedente del Sahara es predominantemente sílice (entre un 50 y un 60%), aluminio (alrededor de un 10%) y otra serie de componentes con una abundancia relativa inferior al 6% (Fe, Mn, Mg, Ca, Na,...). Fernandopullé (1974) realizó análisis del agua de lavado de dicho polvo, obteniendo siempre aguas ricas en Na, HCO₃, Cl y SO₄, posiblemente debido a que son los iones más solubles, aunque cuantitativamente no sean abundantes. En las islas orientales del Archipiélago Canario (Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria), los estudios del agua de lluvia llevados a cabo por diversos autores (Custodio, 1974a, 1974b; Soler y Lozano, 1985; Herrera, 2001; Muñoz, 2005) indican que dicho polvo origina un incremento de sales en el agua de infiltración, si bien este es pequeño frente al aporte directo por el aerosol marino, excepto de NO₃ y PO₄ (Fernandopullé, 1974; Custodio, 1974b).

Mientras en las islas orientales del Archipiélago Canario existen diversos estudios sobre la composición química del agua de lluvia (Fernandopullé, 1974; Custodio, 1974b; Gasparini et al., 1990; Herrera, 2001; Muñoz, 2005; Custodio, 2009b), no se han encontrado datos previos ni del acuífero de Las Cañadas ni de ninguna otra zona de Tenerife. Por tanto, el presente estudio tuvo como uno de sus objetivos caracterizar la composición química del agua de lluvia en Tenerife y especialmente en el acuífero de Las Cañadas y así mejorar el conocimiento sobre la aportación atmosférica de sales a las aguas subterráneas y sobre la recarga del mismo a través del balance químico de iones conservativos en el agua de recarga (i.e. Alcalá, 2006) (ver capítulo 6 de la presente tesis).

En los estudios hidrogeológicos en islas volcánicas oceánicas es muy frecuente el uso de las variaciones en los contenidos en deuterio (δD) y oxígeno ($\delta^{18}O$) en las precipitaciones para estimar las áreas de recarga, indicar mezcla de aguas, separar diferentes acuíferos, determinar las líneas de flujo o el tiempo de residencia de las aguas subterráneas (i.e. Gasparini et al., 1990; Veeger, 1991; Scholl et al., 1995, 1996; Hildenbrand et al., 2005; Asai et al., 2009). La composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD en la precipitación varía considerablemente en función de muchos factores, pero en general se hace más ligera cuando aumenta la altitud, latitud y la distancia a la fuente de vapor, y cuando disminuye la temperatura ambiente (Dansgaard, 1964). Incluso dentro un mismo fenómeno tormentoso la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD en las precipitaciones varía en función de la fracción de vapor original restante en la masa nubosa, la posible evaporación parcial de las gotas de lluvia durante su caída, el recorrido de la tormenta y la temperatura de la fuente de vapor (Gat, 1980). Gracias a esta variabilidad temporal y espacial de la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD en las precipitaciones, la relación isotópica de ambos elementos en el agua subterránea suele ser muy útil para identificar el origen de las aguas y de las principales zonas de recarga (i.e. Gasparini et al., 1990; Veeger, 1991; Scholl et al., 1996; Hildebrand et al., 2005; Demlie et al., 2007; Asai et al., 2009).

En las últimas décadas, en las Islas Canarias se han desarrollado diversos estudios sobre la composición isotópica de las precipitaciones que han permitido una primera caracterización de la misma y un mejor conocimiento de la recarga, estableciendo incluso algunas líneas meteóricas locales y gradientes altitudinales (Gonfiantini, 1973; Gonfiantini et al., 1976; Custodio et al., 1987; Gasparini et al., 1987, 1990; Veeger, 1991; Pérez et al., 1995; Herrera y Custodio, 2000; Herrera, 2001; Custodio y Manzano, 2000; Muñoz, 2005). En Tenerife, algunos de dichos trabajos se enmarcaron en el proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO, 1970-1975) y en el proyecto de prospección geotérmica en Tenerife llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) entre 1983 y 1993, ambos ampliamente comentados en el capítulo 1 de la presente tesis. Por ejemplo, Gonfiantini (1973) obtuvo por primera vez, con una cantidad de datos limitada procedente de manantiales, la línea meteórica local de Tenerife ($\delta^2H = 6,57 \cdot \delta^{18}O + 6,75$). Sin embargo, Custodio et al. (1987), con la adquisición de nuevos datos de precipitación en Tenerife, pudieron determinar con un mayor detalle una nueva línea meteórica local adoptando una pendiente de 8, para que el término

aditivo represente el exceso de deuterio ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15$). No obstante no se disponen de datos publicados de la composición química de las precipitaciones en Tenerife y tras el último estudio realizado por Custodio et al. (1987) no se han encontrado datos actualizados de la composición isotópica.

El principal objetivo de este capítulo es caracterizar química e isotópicamente las precipitaciones en las vertientes norte y sur de Tenerife y especialmente en el acuífero de Las Cañadas, para poder así determinar la aportación química de las precipitaciones a la recarga del acuífero e interpretar posteriormente la composición de las aguas subterráneas y su relación con la circulación en dicho acuífero.

El presente capítulo está estructurado en 4 secciones que comprenden una **descripción de la sistemática del muestreo de la precipitación** llevada a cabo en la presente tesis, seguida de una sección en la que se trata de determinar la **representatividad espacial, temporal y cuantitativa de las precipitaciones registradas** durante el periodo de observación, tras la cual se ha realizado una **caracterización química de la precipitación**, haciendo especial hincapié en **la deposición atmosférica** y, por último, la **caracterización isotópica de la precipitación**.

3.2. SISTEMÁTICA DEL MUESTREO DE LA PRECIPITACIÓN

La abrupta topografía de Tenerife, junto a la diversidad de microclimas existentes, para la correcta caracterización química e isotópica de las precipitaciones y sus variaciones espaciales exige una red de control mucho más densa que la que suele usarse en medios continentales (Richter et al., 1983; Braojos, 1997). Por tanto, el presente estudio se llevó a cabo con una red de 22 pluviómetros diseñados específicamente para dicho fin y que trató de cubrir un perfil N-S de Tenerife, atravesando el acuífero de Las Cañadas, objeto de estudio en la presente tesis (Figura 3.1.). La red fue instalada siguiendo aproximadamente la dirección dominante de transporte de humedad atmosférica y cada 200 metros de altitud (desde los 9 hasta los 2153 m.s.n.m.), para disponer de puntos a cotas bien distribuidas y así obtener una buena representatividad espacial del área de estudio (Figura 3.1.). El periodo de observación comenzó en septiembre de 2005 y finalizó en febrero de 2007. Se tomaron muestras del agua de lluvia acumulada mensualmente en cada pluviómetro para su posterior análisis químico (pH, conductividad eléctrica e iones mayoritarios) e isotópico (isótopos estables de oxígeno e hidrógeno). No obstante y como se verá más adelante, debido a diferentes causas (vandalismo, problemas de conservación, etc.), no todos los pluviómetros tienen el mismo periodo de observación.

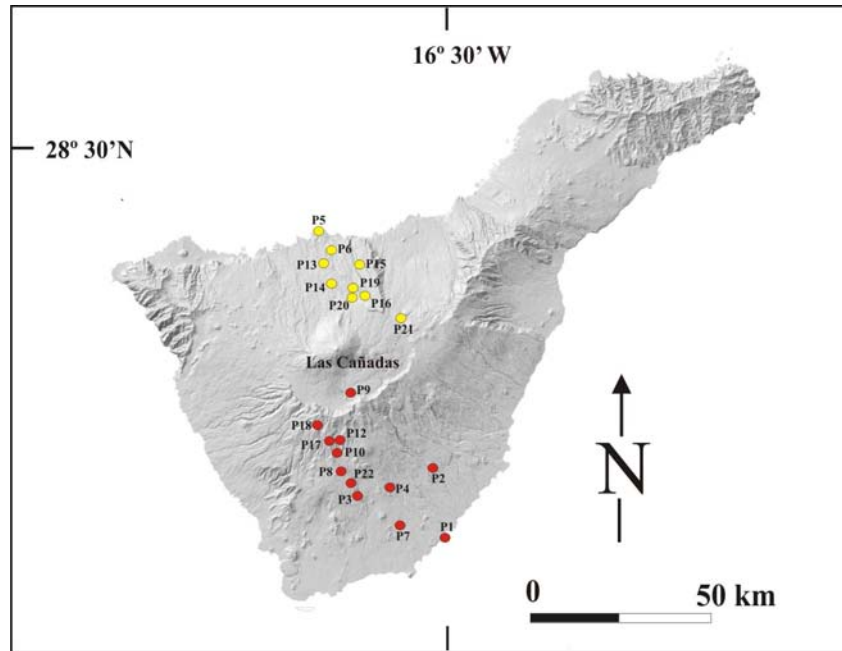


Figura 3.1. Mapa de sombras de Tenerife con la ubicación de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis, indicados en color rojo los de la vertiente sur y en amarillo los de la vertiente norte.

Cada pluviómetro fue construido con un tubo de PVC de 1,5 m de alto y 0,16 m de diámetro ($0,02 \text{ m}^2$ de superficie), con un embudo colector de plástico conectado a través de una manguera con un depósito de plástico, donde se almacena el agua de lluvia captada (Figura 3.2.). En el interior de dicho depósito, cuya capacidad máxima es de 3125 mL que (representa una precipitación de $3125 \cdot 50 = 156,3 \text{ mm}$, o $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$), se añadió 50 mL de parafina líquida para crear una capa de más de 1 cm de espesor e impedir así la evaporación del agua y la consiguiente modificación química e isotópica de la muestra. El agua de lluvia almacenada en cada pluviómetro fue recolectada al final de cada periodo para su posterior análisis en el laboratorio. Previamente a la toma de las muestras, con un matraz de precisión se midió el volumen de agua almacenada durante el periodo en cada pluviómetro.

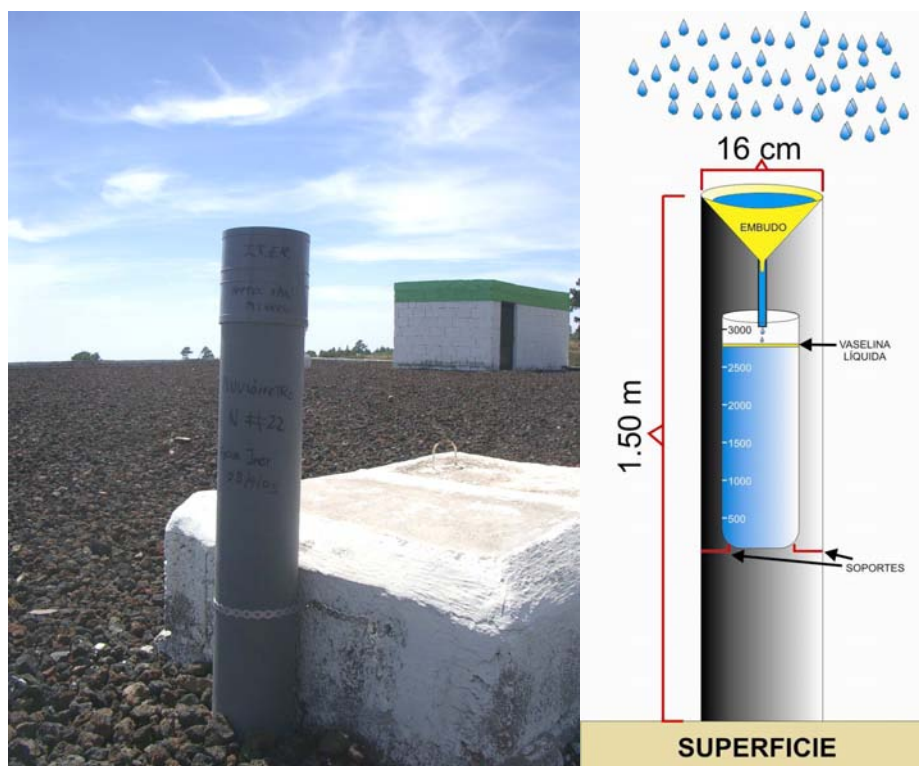


Figura 3.2. Foto del pluviómetro N° 22 (P22) y esquema general en sección de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis.

Las muestras de agua de lluvia para el análisis químico se recogieron en 2 botes de 125 mL de HDPE (polietileno de alta densidad) para evitar adsorciones. En el propio punto de muestreo, el agua de uno de los botes se hizo pasar por un filtro de $0,45 \mu\text{m}$ y se acidificó hasta $\text{pH} < 2$ (0,2% v/v) con ácido nítrico TracePur, para evitar la precipitación de los cationes en su posterior análisis. Para el análisis de la composición isotópica del deuterio (δD) y el oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) las muestras de agua de lluvia se recogieron en botes de cristal topacio de 15 mL, tratando de no dejar burbujas en su interior, a los que se les añadió CuCl_2 para evitar la generación de actividad bacteriológica que interfiera cuantitativamente en los resultados.

Durante el periodo de traslado y almacenamiento, previo al análisis de laboratorio, las muestras fueron conservadas en refrigeradores a temperatura estable de $4 \text{ }^\circ\text{C}$ y fuera del alcance de la radiación solar. El pH y la conductividad eléctrica se determinaron en el laboratorio utilizando un pHmetro Radiometer modelo PHM 92 y un conductímetro Radiometer modelo CDM 210, respectivamente. Previa a su utilización, cada electrodo fue calibrado con los estándares adecuados. En el caso de la conductividad eléctrica, la calibración se efectuó con una disolución estándar de KCl 0,01M, de la marca Metrohm, que a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ posee una conductividad eléctrica de $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$. El pH fue también calibrado con soluciones tampón de pH 4, 7 y 9 (a $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Además del pH y conductividad eléctrica, en el laboratorio del ITER también se determinó la alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) de las muestras así como los contenidos en aniones y cationes mayoritarios (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , F^- , Cl^- , Br^- ; SO_4^{-2} , NO_3^- y PO_4^{-3}), siguiendo

metodologías estándar (Standard Methods, APHA-AWWA-WEF, 2001). La alcalinidad de las muestras se determinó por valoración con un ácido estándar (HCl) de diferentes normalidades (entre 0,01 y 0,001 N) en un valorador ácido-base automático marca Metrohm, modelo 716 DMS Titrino.

Los contenidos en cationes mayoritarios en las muestras de agua de lluvia filtradas y acidificadas previamente se determinaron con un ICP-OES Perkin-Elmer modelo OPTIMA 3300DV, mientras que los contenidos en aniones mayoritarios del agua de lluvia fueron analizados con un cromatógrafo líquido DIONEX DX-500. La precisión del cromatógrafo líquido empleado fue siempre de una desviación estándar relativa (RSD, Relative Standard Deviation) menor del 1 %, obtenida a partir de 10 medidas consecutivas de un patrón sintético con los elementos a analizar. El límite de cuantificación del ICP-OES para los cationes mayoritarios osciló entre 0,5 µg/L para el Mg⁺² y 10,6 µg/L para el K⁺.

Los análisis isotópicos de ¹⁶O, ¹⁸O, ²H y ¹H se realizaron en muestras separadas por medio de un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (IRMS en inglés: Isotope Ratio Mass Spectrometer) marca Termo, modelo Finnigan MAT 253. La relación isotópica δ¹⁸O se obtuvo a partir del oxígeno del dióxido de carbono equilibrado con el agua a una temperatura ambiente y estable (Epstein y Mayeda, 1953). Por su parte, la relación isotópica δD se obtuvo a partir del hidrógeno equilibrado con el agua usando un catalizador de platino (Pt) (Coplen et al, 1991).

La relación entre las concentraciones de los isótopos pesados (¹⁸O y ²H) y los más ligeros y abundantes (¹⁶O y ¹H) se expresa como δ¹⁸O y δD en tanto por mil (‰) respecto al patrón V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) que representa el valor medio de dicha relación en el agua de mar, según las definiciones siguientes:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰ V-SMOW}) = \left[\frac{O_{\text{muestra}} - O_{\text{V-SMOW}}}{O_{\text{V-SMOW}}} \right] \cdot 1000 \quad [3.1.]$$

$$\delta\text{D} (\text{‰ V-SMOW}) = \left[\frac{D_{\text{muestra}} - D_{\text{V-SMOW}}}{D_{\text{V-SMOW}}} \right] \cdot 1000 \quad [3.2.]$$

Obteniendo los valores de $O = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ y $D = \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}$ de las definiciones:

$$O = \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right) = \left[\frac{\% \text{atómico } ^{18}\text{O}}{\% \text{atómico } ^{18}\text{O} + ^{17}\text{O} + ^{16}\text{O}} \right] \cdot 100 \quad [3.3.]$$

$$D = \left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right) = \left[\frac{\% \text{atómico } ^2\text{H}}{\% \text{atómico } ^2\text{H} + ^1\text{H}} \right] \cdot 100 \quad [3.4.]$$

La precisión de los análisis fue de ±0,5 ‰ y ±0,05 ‰ para el δD y el δ¹⁸O, respectivamente. Se usaron como patrones de trabajo 5 muestras de aguas calibradas con

respecto al estándar internacional V-SMOW en el laboratorio geoquímico del Instituto Nazionale di Geophysica e Vulcanologia (INGV) de Palermo, Italia.

3.3. REPRESENTATIVIDAD DE LOS RESULTADOS

En esta sección se ha tratado de determinar la representatividad temporal (variabilidad intra e interanual), espacial y cuantitativa de la precipitación registrada durante el periodo de muestreo en la presente tesis. En la Tabla 3.1. se han resumido las principales características de la red de 22 pluviómetros instalada a lo largo de un perfil que cruza la isla de norte a sur. Los pluviómetros instalados dentro o cerca de los límites del acuífero de Las Cañadas (línea amarilla en la Figura 3.3.) están marcados con azul en la Tabla 3.1.

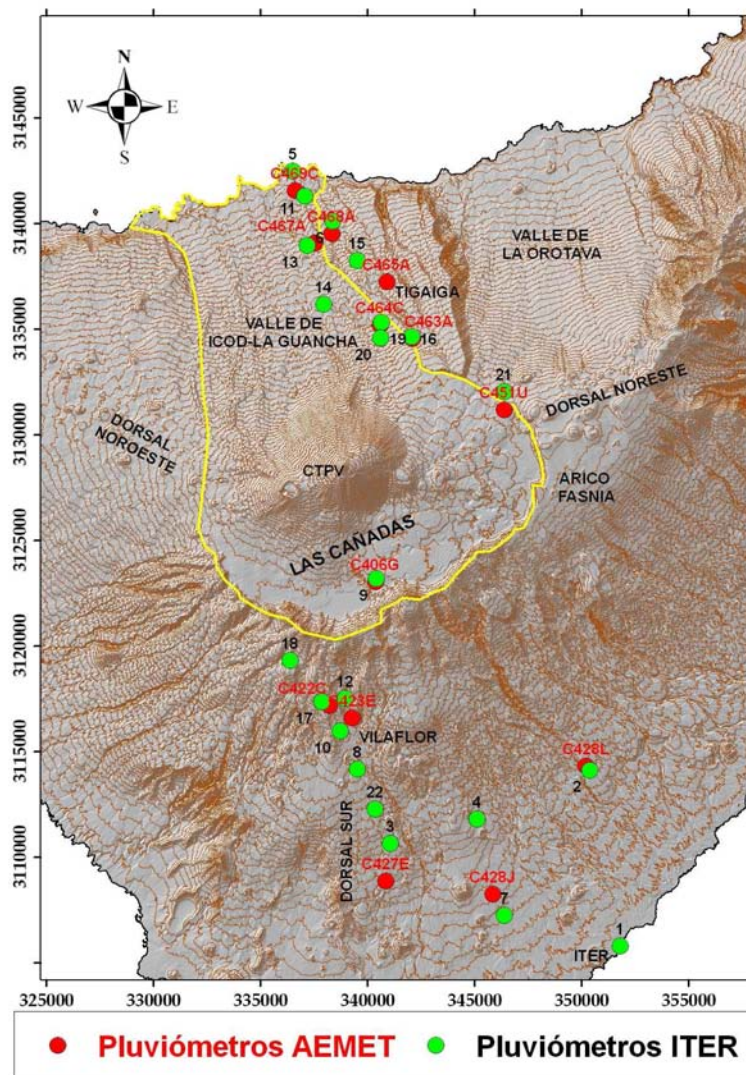


Figura 3.3. Ubicación de los pluviómetros instalados en la presente tesis (ITER) y aquellos de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) con los que se han comparado los resultados de precipitación obtenidos. La línea amarilla marca el límite de la Zona III según el CIATFE (PHI, 1996). Curvas topográficas cada 50 metros.

Tabla 3.1. Datos principales de los pluviómetros instalados en la presente tesis (serie P) y de los pluviómetros de la AEMET (serie C) ubicados en las proximidades de cada pluviómetro y que han sido utilizados para comparar los resultados de precipitación media mensual (P media). Los pluviómetros en azul son aquellos ubicados dentro de los límites o en las proximidades del acuífero de Las Cañadas (ver Figura 3.1.).

Nombre	Descripción	Vertiente	X UTM (m)	Y UTM (m)	Z (m.s.n.m.)	Distancia al mar (m)	P media (mm/mes)	P total (mm)	Periodo de observación	Años completos	Correspondencia
P1	ITER	Sur	351799	3105761	9	134	23,3	420,2	Sept05-Feb07	1	C428J
P2	EL RIO	Sur	350381	3114098	477	6459	25	424,7	Sept05-Feb07	1	C428L
P3	HORNO DE LEÑA	Sur	341054	3110622	817	9466	44,8	806,5	Sept05-Feb07	1	C427E
P4	AYTO. GRANADILLA	Sur	345129	3111785	644	8958	43,8	788,0	Sept05-Feb07	1	C427E
P5	LAS PUNTAS	Norte	336500	3142461	60	165	30,6	549,9	Sept05-Feb07	1	C469C
P6	PARQUE MOVIL AYTO. LA GUANCHA	Norte	338360	3140098	436	2034	49,1	834,9	Sept05-Feb07	1	C468A
P7	ESTADIO RAQUI S. ISIDRO	Sur	346380	3107236	264	4813	29,7	505,7	Sept05-Feb07	1	C428J
P8	POZO	Sur	339537	3114140	1257	11865	51,9	933,7	Sept05-Feb07	1	C423E
P9	PARADOR	Sur	340412	3123177	2149	18727	50,9	916,7	Sept05-Feb07	1	C406G
P10	HOTEL SPA VILLALBA	Sur	338727	3115940	1486	12315	43,6	740,5	Sept05-Feb07	1	C423E
P11	EL GARABATO	Norte	337079	3141282	180	1222	38,3	651,2	Sept05-Feb07	1	C469C
P12	PINALITO	Sur	338973	3117475	1656	13598	52,5	945,9	Sept05-Feb07	1	C422C
P13	TANQUILLA VERGARA	Norte	337195	3138924	612	3297	46,4	834,4	Sept05-Feb07	1	C467A
P14	EL LAGAR	Norte	337952	3136138	1033	6018	61,6	1108,5	Sept05-Feb07	1	C465A
P15	CASA JUAN PEÑA	Norte	339524	3138221	875	3758	54,6	983,2	Sept05-Feb07	1	C465A
P16	TORRE VIGILANCIA S.J. RAMBLA	Norte	342064	3134615	1711	7761	58	928,5	Oct05-Feb07	1	C463A
P17	TORRE VIGILANCIA VILAFLO	Sur	337872	3117347	1832	12685	46,7	794,2	Oct05-Feb07	1	C422C
P18	PARQUE LAS LAJAS	Sur	336384	3119292	2081	12866	48,6	825,5	Oct05-Feb07	1	C422C
P19	VERGARA 2	Norte	340666	3135283	1316	6734	49,6	793,5	Nov05-Feb07	1	C464C
P20	BCO.VERGARA	Norte	340628	3134547	1475	7466	60,4	1027,6	Oct05-Feb07	1	C463A
P21	CENTRO VISITANTES TEIDE	Norte	346405	3132013	2059	10494	58,4	993,0	Oct05-Feb07	1	C451U
P22	DEPÓSITO AGUA AYTO. SAN MIGUEL	Sur	340364	3112262	1027	11325	60	599,7	Oct05-Abr06	0	C427E
C406G	CAÑADAS-PARADOR	Sur	340399	3123005	2160		34,5		1983-2007	19	9
C422C	VILAFLO-TOPOS TORRE VIGILANCIA	Sur	338216	3117170	1800		33,4		1984-2000	14	12, 17, 18
C423E	VILAFLO-C.F.	Sur	339279	3116563	1515		26,1		1971-1990	9	8, 10
C427E	SAN MIGUEL ABONA	Sur	340873	3108838	590		18,5		1952-2007	35	3, 4, 22
C428J	GRANADILLA-YACO	Sur	345846	3108230	375		15,6		1988-1994	6	1, 7
C428L	ARICO-RIO	Sur	350212	3114304	460		11,9		1950-2007	13	2
C451U	REALEJOS-PORTILLO	Norte	346378	3131140	2118		33,9		1971-2007	30	21
C463A	SAN JUAN RAMBLA-TORRE VIGIL.	Norte	342107	3134525	1700		39,9		1985-1995	10	16,20
C464C	GUANCHA-GALERIA VERGARA II	Norte	340588	3135189	1480		44,6		1985-1995	9	19
C465A	SAN JUAN RAMBLA-CHAMUSCADA	Norte	340911	3137220	1100		57,9		1985-1995	10	14, 15
C467A	GUANCHA-C.F.	Norte	337551	3139061	580		41,4		1975-1998	15	13
C468A	GUANCHA-ASOMADA	Norte	338349	3139498	500		38,2		1996-2001	4	6
C469C	GUANCHA-SANTO DOMINGO	Norte	336640	3141534	150		24		1986-2007	16	5, 11

A partir de los datos de precipitación mensual en cada pluviómetro a lo largo del periodo de observación (de septiembre de 2005 a febrero de 2007) se calculó la precipitación media mensual y la precipitación total de cada uno de ellos en dicho periodo. Debido a que es un periodo de observación muy corto, los valores medios obtenidos son sólo representativos de dicho periodo, y no se trata de valores multianuales. Cabe destacar que en el P22 el periodo de observación sólo fue de octubre de 2005 a abril de 2006 debido a problemas de vandalismo y, por tanto, es muy probable que la precipitación media mensual en este punto esté sobreestimada, ya que fue calculada con los meses de otoño a primavera, cuando las precipitaciones son más cuantiosas, y en un invierno más húmedo de lo normal como se detalla más adelante.

Con el fin de determinar cuantitativamente la representatividad de los resultados de la precipitación obtenidos en la presente tesis, estos datos fueron comparados con los datos cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) procedentes de varios pluviómetros ubicados en las proximidades de los primeros (Figura 3.3.), y cuya representatividad es mayor ya que poseen un número de años de observación más elevado (Tabla 3.1.). La precipitación media mensual de los pluviómetros instalados en la presente tesis varía entre 23,3 y 61,6 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, con un valor medio de 46,7 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$; mientras que en los pluviómetros seleccionados de la AEMET varía entre 11,9 y 57,9 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, con un valor medio de 32,3 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ (Tabla 3.1.).

En la Figura 3.4. se ha representado la diferencia de valores entre la precipitación media mensual en ambos grupos de pluviómetros, teniendo en cuenta la correspondencia geográfica descrita en la Tabla 3.1.. Los valores de precipitación media mensual obtenidos durante el periodo de observación en todos los pluviómetros instalados, a excepción del N° 15, son significativamente superiores (un 34 % de media) a los de los pluviómetros de la AEMET. Como se puede observar, en general estas diferencias son mayores en la vertiente sur que en la vertiente norte (un 45 y un 21% de media, respectivamente) y, además, en la zona de medianías en la vertiente sur y en costa y cumbres en la vertiente norte.

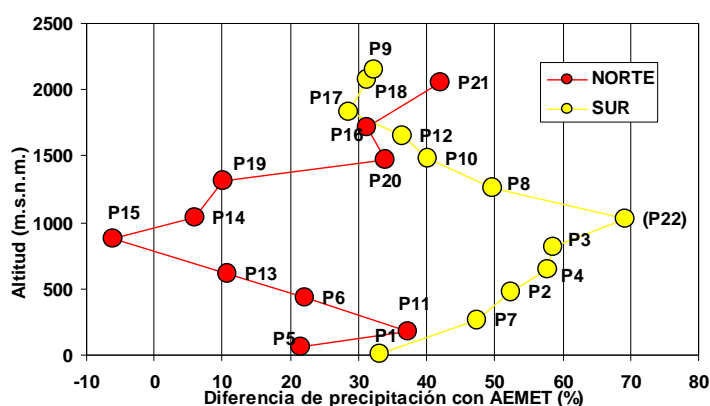


Figura 3.4. Desviación (en %) de los valores medios de precipitación mensual de los pluviómetros instalados en la presente tesis respecto a la media de los pluviómetros de la AEMET (ver Tabla 3.1.), en función de la altitud y para cada vertiente. Los números corresponden con cada pluviómetro de la Tabla 3.1. La máxima diferencia del P22 no es representativa dado que el periodo de observación fue tan sólo de octubre de 2005 a abril de 2006.

Comparando sólo los pluviómetros del acuífero de Las Cañadas (en color azul en la Tabla 3.1.) donde los valores de la precipitación media mensual oscilaron entre 30,6 y 61,6 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, con un valor medio de 50,7 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, la diferencia con los pluviómetros de la AEMET oscilaron entre -6 y 42 %, con un valor medio de 22 %.

En los pluviómetros P9 y P21 ubicados en la Caldera de Las Cañadas (Figura 3.3.), los valores de precipitación media mensual y anual obtenidos en la presente tesis son entre un 32% y un 43 % más elevados que los de los pluviómetros C406G y C451U, respectivamente, con los que se han comparado (Figura 3.4.), confirmando que también en la zona de cumbres el periodo de muestreo fue especialmente lluvioso respecto a los valores medios de la zona.

Aunque en términos anuales, la precipitación durante el periodo de muestreo fue en general superior a la media en prácticamente todos los pluviómetros, es importante tener en cuenta la distribución temporal de las precipitaciones durante dicho periodo. La época más seca a nivel insular suele estar representada por el trimestre junio-julio-agosto, incluyendo a septiembre en muchos lugares de la isla (Ministerio de Medio Ambiente, 2002). A partir de septiembre la cantidad de precipitaciones aumenta considerablemente hasta alcanzar el máximo en los meses de invierno, para ir luego disminuyendo paulatinamente hasta verano (Ministerio de Medio Ambiente, 2002). En la Figura 3.5. se han representado las precipitaciones mensuales registradas en los pluviómetros de la AEMET de los que se poseen datos durante el periodo de muestreo junto con las precipitaciones registradas por los pluviómetros correspondientes según su ubicación e instalados en la presente tesis (ver Tabla 3.1.). También se han representado las precipitaciones promedio de los pluviómetros de la AEMET correspondientes. En la Figura A.3.1. del Anexo A.3. se muestran todas las figuras donde se comparan mes a mes las precipitaciones mensuales registradas en los pluviómetros instalados en la presente tesis con la precipitación promedio de los pluviómetros de la AEMET, agrupados en función de la altitud.

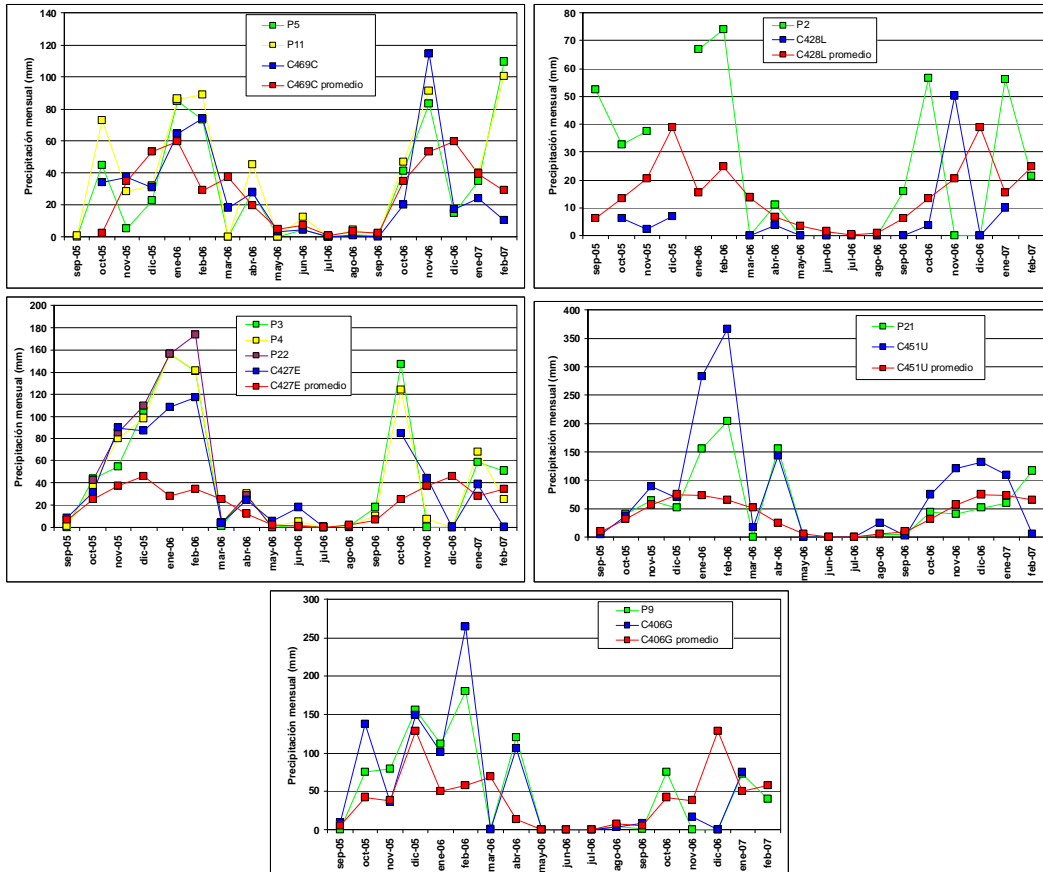


Figura 3.5. Datos de precipitación (en mm) durante el periodo de muestreo de los pluviómetros N° 9 (P9), 21 (P21), 5 (P5), 11 (P11), 2 (P2), 3 (P3), 4 (P4) y 22 (P22) instalados en la presente tesis (líneas verdes, amarillas y violetas), en comparación con la de los pluviómetros C406G, C451U, C469C, C428L y C427E de la AEMET (líneas azules), ubicados relativamente próximos a cada uno de ellos (ver Figura 3.3. para localización). También se ha representado la precipitación promedio interanual de los respectivos pluviómetros de la AEMET (líneas rojas).

En la Figura 3.5. se observa en general una buena correlación tanto cuantitativa como cualitativa de las precipitaciones registradas durante el periodo de muestreo con la distribución esperada a nivel insular y entre los pluviómetros instalados en la presente tesis (P9, P21, P5, P11, P2, P3, P4 y P22) con los respectivos pluviómetros de la AEMET (C406G, C451U, C469C, C428L y C427E), aún cuando los pluviómetros no siempre están próximos los unos de los otros (ver Figura 3.3.). Las mayores diferencias observadas entre las precipitaciones mensuales registradas en los pluviómetros instalados en la tesis y los de la AEMET, (i.e. en los meses de enero y febrero de 2006 en P9 y P21 o en los meses de octubre y noviembre de 2006 en P2) posiblemente estén relacionadas con que ambos tipos de pluviómetros son totalizadores y, por tanto, los periodos de muestreo en uno y otro caso no tienen por qué ser los mismos, pudiendo estar incluidas, en unos, las lluvias de finales o principios de cada mes y, en otros, no.

Comparando los valores de la precipitación mensual registradas durante el periodo de muestreo en los pluviómetros instalados en la presente tesis con la precipitación promedio de los pluviómetros de la AEMET (Figuras 3.3. y A.3.1.), en general se observa que el invierno de 2005/2006 fue considerablemente más húmedos que la media. En cambio, el invierno de 2006/2007 fue en general sólo algo más secos que la media.

Respecto a la representatividad espacial de las precipitaciones, en la Figura 3.6. se muestran los valores de precipitación media mensual obtenidos en la presente tesis en cada pluviómetro en función de la altitud junto a la precipitación promedio de los diferentes pluviómetros de la AEMET (Tabla 3.1.). En dicha figura se observa que los datos obtenidos se ajustan al régimen pluviométrico insular (PHI, 1996), donde la vertiente norte o de barlovento es cuantitativamente más lluviosa que la vertiente sur o de sotavento y los máximos pluviométricos se obtuvieron en la zona de medianías de la vertiente norte y los mínimos en la zona de costa de la vertiente sur.

En la vertiente norte, la distribución altitudinal de las precipitaciones registradas en los pluviómetros de la presente tesis es muy similar a la precipitación promedio de los pluviómetros de la AEMET hasta los 1400 m.s.n.m., que coincide con la zona de inversión térmica en la que se produce el "mar de nubes". Por encima de esta cota, las precipitaciones registradas en la presente tesis han sido notablemente superiores (especialmente en el invierno de 2005/2006) a las precipitaciones promedio de los pluviómetros de la AEMET, las cuales disminuyen considerablemente.

En la vertiente sur las precipitaciones registradas en la presente tesis son en general mucho más abundantes que las precipitaciones promedio de los pluviómetros de la AEMET, e incluso se observa una variación altitudinal mucho más importante que en la de estos últimos, los cuales presentan una disminución relativamente constante con la altitud.

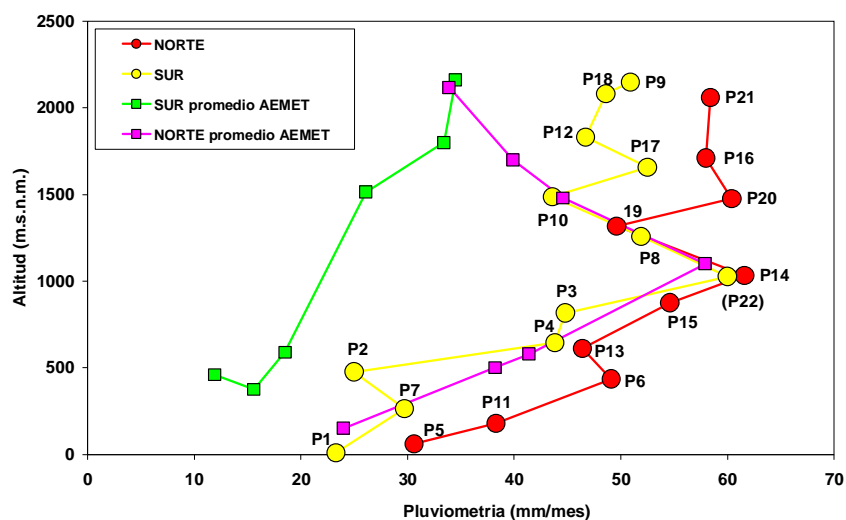


Figura 3.6. Variación altitudinal de la precipitación media mensual (mm/mes) en los 22 pluviómetros instalados en las vertientes norte (rojo) y sur (amarillo) de Tenerife en la presente tesis, frente a las precipitaciones promedio de los pluviómetros de la AEMET, tanto de la vertiente norte (malva) como de la vertiente sur (verde). La precipitación media mensual de los pluviómetros instalados en la presente tesis corresponde con el promedio de los valores mensuales durante el periodo de muestreo (septiembre de 2005 a febrero de 2007). Se puede observar en ambas vertientes una tendencia ascendente de las precipitaciones con la altitud hasta los 1000-1500 m.s.n.m., a partir de los cuales se estabilizan. Ver más explicación en el texto.

■ Discusión

Durante el periodo de observación, la distribución temporal y espacial de las precipitaciones en los pluviómetros instalados para la presente tesis fue, en general, similar al régimen pluviométrico insular, registrándose las mayores precipitaciones en los meses de octubre a febrero y en la zona de medianía de la vertiente norte o barlovento, mientras que las menores precipitaciones se obtuvieron en los meses de mayo a agosto y en la zona costera de vertiente sur o de sotavento.

Desde un punto de vista cuantitativo, las precipitaciones registradas por los pluviómetros instalados en la presente tesis durante el periodo de muestreo fueron en general siempre superiores a los valores medios observados en las estaciones de referencia de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). En la Caldera de Las Cañadas, que según el PHI (1996) constituye la principal zona de recarga del acuífero de Las Cañadas, se registraron entre un 23 y un 43 % más de precipitaciones durante el periodo de observación que la media de las estaciones de la AEMET ubicadas en la misma zona. Esta diferencia se debe principalmente a las abundantes lluvias registradas durante los meses de enero y febrero de 2006 ya que durante los meses de invierno de 2006/2007 las precipitaciones fueron en algunos casos incluso algo menores a los valores medios de los datos de la AEMET.

La variación altitudinal de la precipitación registrada por los pluviómetros instalados en la presente tesis es relativamente similar en ambas vertientes, pero siendo cuantitativamente más importante en la vertiente norte, aumentando progresivamente con la altitud hasta los 1000 m.s.n.m. y manteniéndose luego relativamente constante hasta la zona de cumbres. Este comportamiento difiere notablemente de los valores medios obtenidos a partir de los datos de la AEMET en ambas vertientes, ya que aunque la vertiente norte es también más húmeda que la vertiente sur, en la vertiente norte a partir de los 1000 m.s.n.m. aproximadamente las precipitaciones vuelven a disminuir progresivamente, y en la vertiente sur la disminución de las precipitaciones es relativamente constante desde la zona de costa hasta la zona de cumbre.

En función de los datos expuestos, la representatividad de los resultados obtenidos en la presente tesis es mayor en la vertiente norte (especialmente en la zona de medianías), que se corresponde con el acuífero de Las Cañadas, que en la vertiente sur, ya que en general el periodo de muestreo fue especialmente húmedo en esta última vertiente en comparación con los valores medios de la AEMET.

Por tanto, en general la representatividad de las precipitaciones obtenidas en la presente tesis para una correcta caracterización química e isotópica de las precipitaciones es limitada, tanto por el corto periodo de muestreo como por la diferencia con los valores medios interanuales, indicando que dichos resultados sólo son válidos para realizar una primera aproximación a las características químicas e isotópicas de la precipitación, haciendo necesario en futuros trabajos un periodo de observación más largo que minimice la influencia de los años extremos.

3.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN

■ Datos químicos utilizados

De un total de 217 muestras de agua de lluvia analizadas, sólo 69 de ellas (un 31%) tiene un porcentaje de error del balance iónico (IBE, Ion Balance Error) menor de un 10 %. El IBE se calculó según la siguiente fórmula:

$$\text{IBE (\%)} = \left[\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right] \cdot 100 \quad [3.5.]$$

Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2004) a menudo las aguas de lluvia con un pH superior a 5,5 o 6,0 suelen tener un déficit de aniones que, aunque no se conoce aún bien sus causas, tal vez puede estar relacionado con la presencia de grupos de componentes con una acidez débil que no suelen ser analizados, como por ejemplo ciertas sustancias orgánicas (WMO, 2004). Por tanto, la WMO estipula que en función del pH y del contenido aniónico y catiónico del agua de lluvia analizada el error admisible varía. Además hay que considerar que debido a que las concentraciones de iones medidas en las precipitaciones, por lo general están cerca del límite de detección de los instrumentos, la incertidumbre en la medida es mayor. En el caso de las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis, siguiendo la metodología descrita por la WMO (WMO, 2004) se admitieron como válidas todas aquellas cuyo IBE estaba entre -20 y +20%.

En la Tabla A.3.1. del Anexo 3.1 se han representado todos los resultados de los análisis químicos obtenidos en las muestras de agua de lluvia en los 22 pluviómetros entre septiembre de 2005 y febrero de 2007. En total son 217 análisis, de los cuales 137 análisis (un 63% del total de muestras) tienen un IBE entre los límites fijados por la WMO y en los que como mínimo hay 3 análisis de cada pluviómetro y de todos los meses que se registró lluvia. En los meses de noviembre y diciembre de 2006 no hay muestra en la mayoría de los pluviómetros porque en el interior del depósito de almacenamiento en vez de parafina líquida (solución hidrófoba) se puso por error glicerina (solución no hidrófoba), siendo descartadas todas esas muestras.

■ Composición química general de las precipitaciones

Con el fin de describir estadísticamente los resultados de los análisis de las muestras de agua de lluvia, en la Tabla 3.2. se presenta un resumen de los parámetros más importantes de los datos de la Tabla A.3.1. cuyo IBE está entre -20 y +20%. En este resumen estadístico no se ha tenido en cuenta la composición química de la lluvia recogida en el pluviómetro P1 en el mes de enero de 2006, ya que es una muestra prácticamente salobre ($7010 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de conductividad eléctrica) y que representa un dato muy puntual, dificultando la correcta interpretación del resto de valores.

Tabla 3.2. Resumen estadístico de la conductividad eléctrica (C.E., en $\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH (ambos medidos a 25°C), así como de las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios y de la relación Na/Cl en todas las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis cuyo IBE está entre -20 y $+20\%$ ($r=\text{meq}/\text{L}$). Mar: composición química promedio del mar según Goldberg (1963). Los valores de la relación Na/Cl se obtuvo de la serie de datos completa de la Tabla A.3.1.

	C.E.	pH	rNa	rK	rCa	rMg	rHCO ₃	rCl	rNO ₃	rSO ₄	rNa/rCl
Media	63,3	5,67	0,63	0,04	0,35	0,26	0,07	0,86	0,01	0,14	0,88
Mediana	39,1	5,61	0,28	0,03	0,15	0,06	0,05	0,31	0,01	0,07	0,81
Máximo	471,0	8,81	11,63	0,26	3,22	4,81	0,58	12,07	0,04	1,18	10,1
Mínimo	6,5	4,31	0,02	0,003	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00	0,002	0,11
Desv. Estan.	75,8	0,80	1,24	0,05	0,60	0,71	0,10	1,50	0,01	0,19	0,92
Mar		8,1	456,92	9,72	19,96	111,11	0,05	535,92	0,008	18,43	0,9

En la Figura 3.7. se han representado los histogramas, la media y la desviación estándar del pH y la conductividad eléctrica de todas las muestras analizadas con un IBE entre $\pm 20\%$, sin diferenciar ubicación ni fechas.

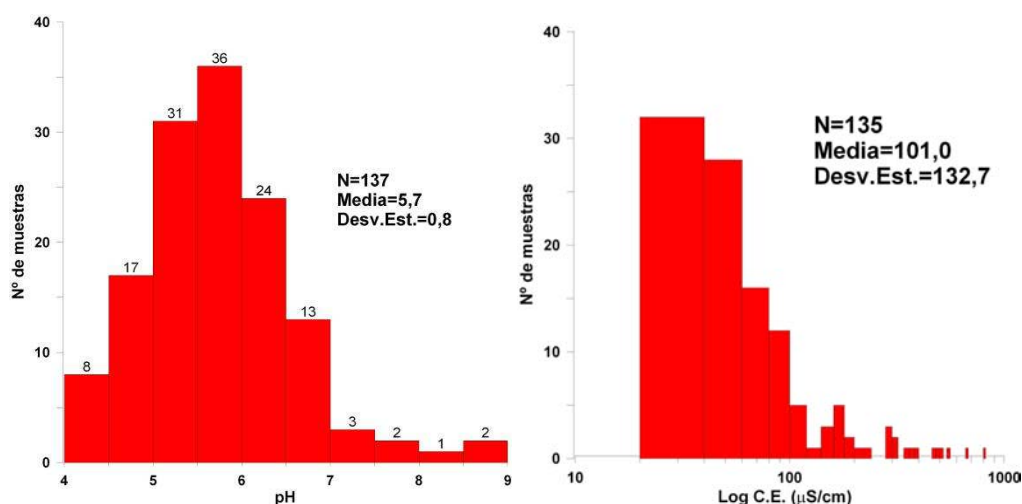


Figura 3.7. Histogramas de la distribución de valores de pH y conductividad eléctrica (C.E.) de las muestras de agua de lluvia analizadas en todos los pluviómetros instalados en la isla de Tenerife en la presente tesis (ver Tabla A.3.1.). N=número de muestras; Desv.Est: desviación estándar; $r=\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$.

El histograma del pH indica una distribución aproximadamente normal de los valores, con una desviación relativamente pequeña, por lo que el valor medio de pH se considera representativo del conjunto de las muestras de agua de lluvia analizadas. Dicho pH medio es ligeramente ácido (pH 5,7), como corresponde a las aguas en equilibrio con el CO_2 atmosférico (pH=5,66; Drever, 1997). De todas las muestras de agua de lluvia analizadas, tan sólo 8 de ellas tienen un pH superior a 7. Dichas aguas presentan una conductividad eléctrica reducida que oscila entre 14 y $80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, lo que parece indicar que en aguas diluidas basta con un mínimo de reacción (i.e. disolución de polvo atmosférico) para dar valores de pH relativamente altos.

Respecto a la conductividad eléctrica, el agua de lluvia del pluviómetro P1 presenta unos valores de varios órdenes de magnitud por encima del resto. La media del resto de lluvias

se encuentra en torno a $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, si bien se observan incrementos relativamente importantes en las primeras lluvias tras los periodos de estiaje, como se describirá más adelante.

En la Figura 3.8. se han representado las concentraciones de los iones mayoritarios de todas las muestras analizadas con un IBE entre $\pm 20\%$. Se observa que en general los valores de los diferentes iones siguen una distribución log-normal, aunque con una dispersión importante de los valores, especialmente del Cl, Na, Ca, Mg y SO_4 .

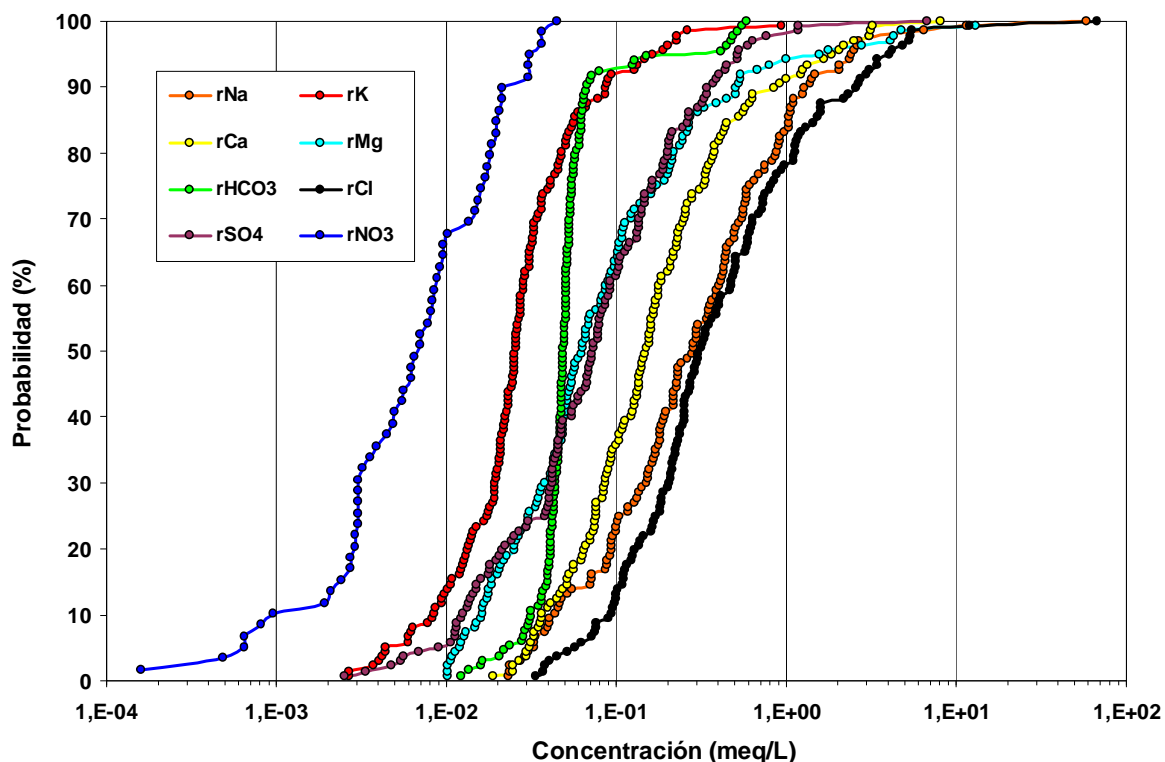


Figura 3.8. Diagrama de probabilidad acumulada de la concentración (en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) de Na, K, Ca, Mg, HCO_3 , Cl, SO_4 y NO_3 de las muestras de agua de lluvia analizadas en todos los pluviómetros instalados en la presente tesis (ver Tabla A.3.1.).

El contenido en cloruros en las aguas de lluvia presenta una gran dispersión, con valores que oscilan entre $0,03$ y $12,1 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$. Sin embargo sólo 5 muestras de agua de lluvia de las 137 analizadas con un IBE entre ± 20 superan los $5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, casi todas registradas en el pluviómetro N^o 1. Este resultado puede deberse a que dicho pluviómetro se encontraba muy próximo a la costa (a menos de 1 km en línea recta) y en un área de vientos intensos y constantes que han facilitado el transportarte del aerosol marino, generando una importante deposición seca en el colector (constatada en el momento del muestreo), que luego fue arrastrada por las lluvias hacia el interior del depósito e incorporada al agua almacenada.

A partir de la Tabla 3.2. se puede observar como los valores de la media y la mediana de la relación iónica $r\text{Na}/r\text{Cl}$ son muy similares al de la composición química promedio del mar, indicando que posiblemente el aporte de ambos iones tienen un mismo origen, predominantemente marino y con muy poca disolución de polvo local. Esta hipótesis concuerda

con los resultados obtenidos, dado que en general la concentración de estos dos iones disminuye con la altitud y por tanto, con la mayor distancia a la costa (Figura 3.9.).

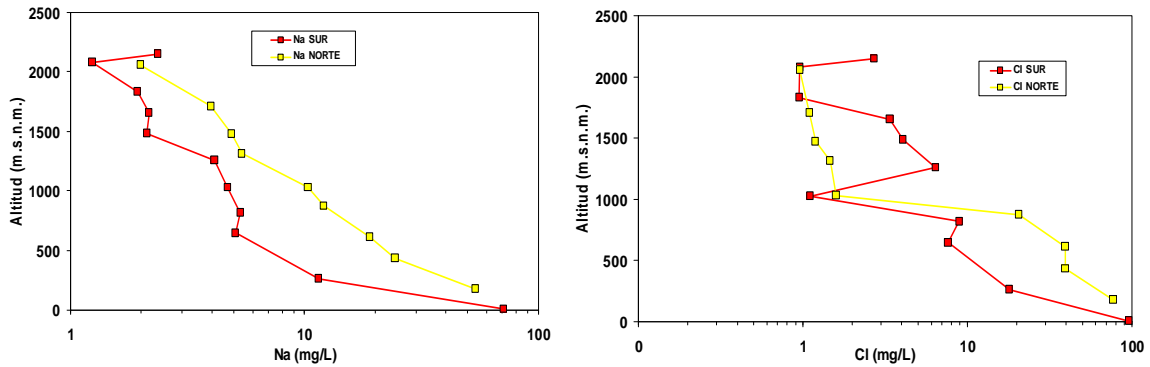


Figura 3.9. Perfil altitudinal de las concentraciones de cloruros (izquierda) y sodio (derecha) en las aguas de lluvia de la vertiente norte (rojo) y sur (amarillo) de la isla de Tenerife durante el mes de noviembre de 2005. En ambas vertientes se observa claramente una correlación inversa del contenido en cloruros y sodio con la altitud y, por lo tanto, con la lejanía a la costa.

En la Figura 3.10. se ha representado la conductividad eléctrica de las muestras de agua de lluvia frente a la concentración de sodio (Na) y cloruros (Cl) en las mismas. Se puede observar una buena correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido en cloruros y sodio, indicando que el principal aporte de salinidad a la precipitación es en forma de halita (NaCl).

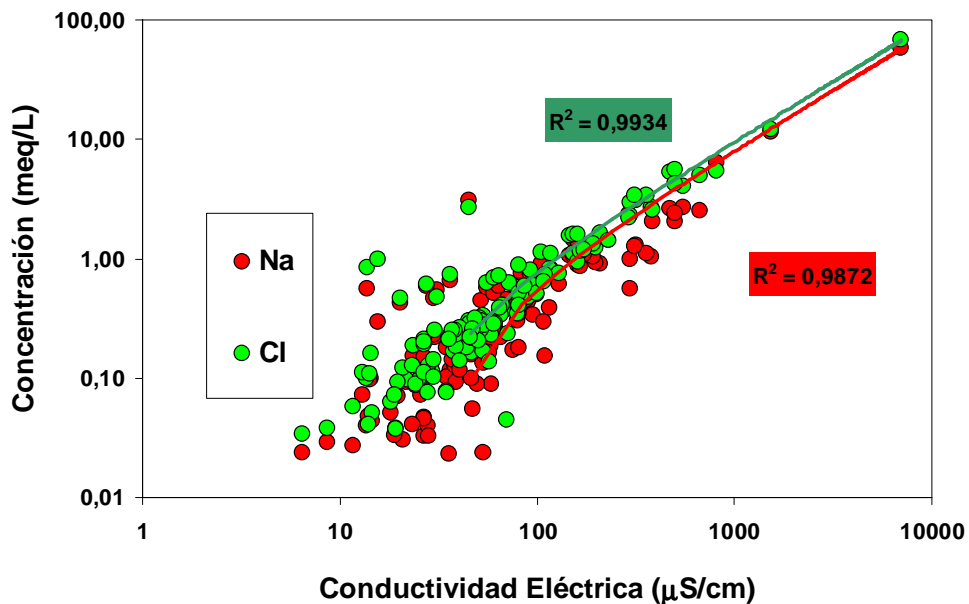


Figura 3.10. Diagrama bilogarántico de la conductividad eléctrica frente a la concentración de sodio (Na) y cloruros (Cl) en las muestras de agua de lluvia analizadas en la presente tesis de investigación. Se puede observar una buena correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido en ambos iones, aunque ésta disminuye cuando la conductividad eléctrica es baja debido al dominio de otros iones.

■ Diagramas composicionales

Se han elaborado diagramas logarítmicos verticales de "Schoeller-Berkaloff" de la composición química de las muestras de agua de lluvia analizada en cada pluviómetro. Todos los diagramas se presentan en la Figura A.3.2. del Anexo A.3.

Para facilitar la visualización e interpretación de los resultados también se ha calculado para cada uno de los aniones y cationes mayoritarios de los 22 pluviómetros instalados la media ponderada en función de la precipitación, así como la composición química promedio del mar (según Goldberg, 1963) (Tabla 3.3.). Los resultados de la Tabla 3.3. se han representado en un diagrama logarítmico vertical de Schoeller-Berkaloff y en un diagrama de Stiff modificado sobre un mapa de Tenerife (Figuras 3.11. y 3.12, respectivamente).

Tabla 3.3. Concentración promedio ponderada, en función de la precipitación, de la composición química del agua de lluvia analizada en cada pluviómetro (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Mar: composición química promedio del mar según Goldberg (1963). Nº: número del pluviómetro. n.d.: no determinado.

Nº	Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	F	Br	PO ₄
P1	203,89	7,06	24,70	24,94	16,72	46,70	323,67	0,25	0,48	0,86	n.d.
P2	4,09	0,62	5,08	0,73	2,51	4,36	8,91	n.d.	0,01	n.d.	4,44
P3	8,08	1,06	3,81	1,78	2,66	4,78	16,93	2,03	0,03	n.d.	n.d.
P4	4,04	0,82	3,43	0,81	3,30	2,99	9,70	0,11	0,02	0,02	n.d.
P5	15,61	1,01	4,26	1,73	9,67	4,67	27,32	1,08	0,01	0,13	n.d.
P6	9,34	0,93	4,18	1,07	3,01	4,06	16,92	0,78	0,02	0,13	0,18
P7	12,65	0,73	5,50	2,38	8,69	17,87	21,22	0,34	0,04	n.d.	n.d.
P8	4,68	1,08	2,67	0,42	2,92	3,45	10,32	1,22	0,01	0,03	0,14
P9	3,36	0,45	3,10	0,58	2,96	2,89	8,81	n.d.	0,01	1,63	n.d.
P10	2,57	1,35	3,45	1,40	2,59	1,76	10,63	0,71	0,02	0,04	n.d.
P11	10,89	1,05	3,08	1,22	2,94	3,54	17,85	0,49	0,01	0,05	n.d.
P12	8,59	0,79	3,98	0,51	6,16	3,62	13,80	0,92	0,18	n.d.	n.d.
P13	8,87	0,98	1,46	1,25	2,82	2,40	15,84	0,24	0,01	0,04	n.d.
P14	4,20	0,83	2,57	0,59	6,32	1,57	6,55	0,47	0,02	0,17	n.d.
P15	7,37	0,83	1,65	1,15	2,91	3,07	12,92	0,38	0,06	0,05	n.d.
P16	1,56	0,74	1,55	0,36	2,92	1,19	4,08	0,39	0,03	n.d.	0,02
P17	1,66	0,59	2,33	1,15	3,00	3,38	4,48	0,85	n.d.	n.d.	n.d.
P18	0,86	0,40	3,53	0,17	2,70	0,71	6,06	0,64	n.d.	n.d.	n.d.
P19	1,00	0,46	1,28	0,15	2,84	1,51	2,23	0,06	0,04	0,03	n.d.
P20	1,78	0,69	0,66	0,29	2,96	1,66	2,54	0,42	0,01	0,03	0,02
P21	2,50	0,76	2,36	0,74	6,33	2,34	4,19	0,26	0,01	n.d.	0,12
P22	2,59	1,28	1,03	0,31	3,13	2,98	4,50	0,26	n.d.	n.d.	n.d.
Mar	10500	380	400	1350	1,3	2817	20909	65	0,5	885	0,07

DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF

Composición química ponderada de las precipitaciones

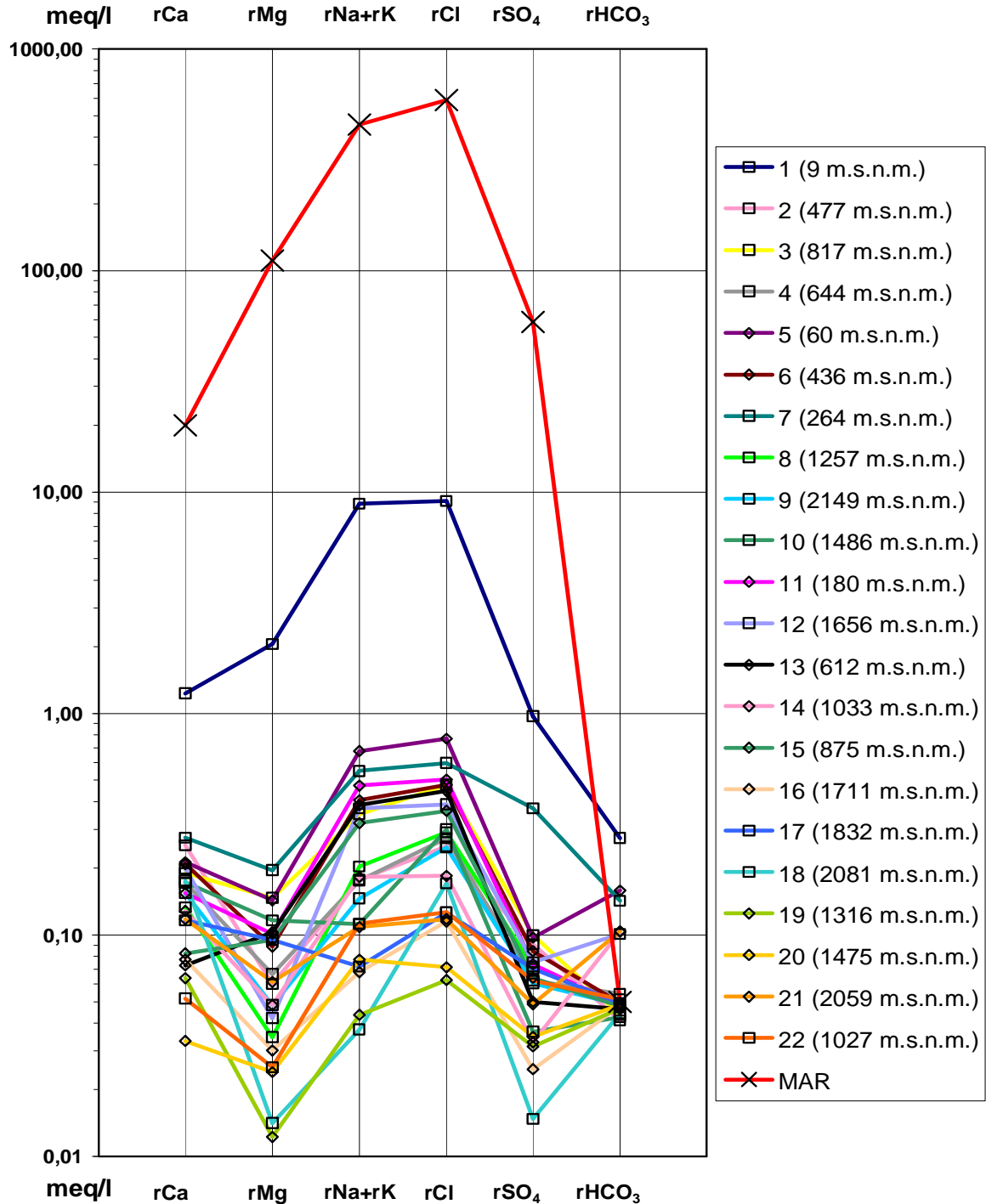


Figura 3.11. Diagrama de Schoeller-Berkaloff de la composición química media del mar (según Goldberg, 1963) y de la composición química media ponderada de las muestras de agua de lluvia analizada de cada uno de los 22 pluviómetros instalados en la presente tesis (Tabla 3.3.). Cuadrados: vertiente sur; Rombos: vertiente norte.

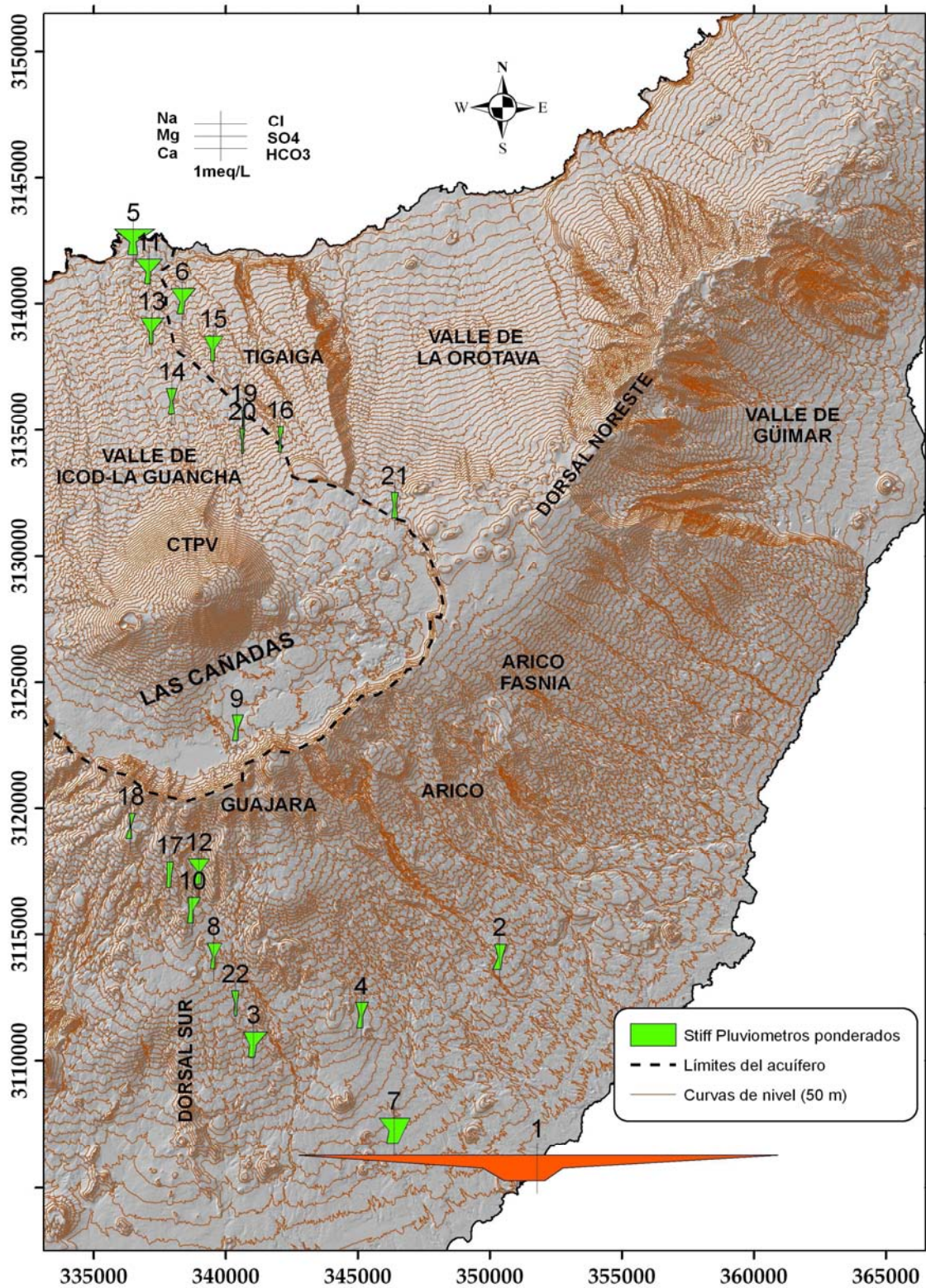


Figura 3.12. Mapa de situación de los 22 pluviómetros con la composición química promedio ponderada de las muestras de agua de lluvia representada según el diagrama de "Stiff modificado". El pluviómetro P1 tiene un color naranja diferente al resto para resaltar que presenta una concentración anormalmente elevada en casi todos los iones, e indicando que estos resultados han sido tomados sólo como aproximativos a lo largo de la presente tesis.

En la Figuras 3.11. y 3.12. se puede observar que la mayoría de las aguas de lluvia tienen una composición química media ponderada del tipo clorurada-sódica o clorurada-cálcico-sódica, aunque con diferentes grados de salinidad.

En la Figura 3.12. se aprecia claramente una correlación inversa del contenido iónico de las muestras en las dos vertientes con la altitud y, por lo tanto, con la distancia a la costa. En la vertiente norte, correspondiente al acuífero de Las Cañadas, la disminución de la concentración de iones se produce manteniendo la composición clorurada-sódica, indicando que el principal aporte de sales proviene del mar en forma de aerosol marino y, con el incremento de altitud y distancia al mar, su efecto va disminuyendo. En cambio, en la vertiente sur, aunque también se observa el mismo proceso, las aguas de lluvia modifican levemente las facies hidroquímicas, con concentraciones relativamente importantes de calcio, magnesio y bicarbonato, que tal vez proceden del polvo atmosférico transportado por el viento y del CO₂ atmosférico disuelto.

El agua de lluvia del pluviómetro P1 presenta una composición química media ponderada con una salinidad mucho más elevada que la registrada en el resto de pluviómetros. Tal y como se ha comentado anteriormente, para explicar el elevado contenido en cloruros del agua de lluvia en dicho pluviómetro, esta elevada salinidad se debe a su posición geográfica, ya que se encuentra muy próximo al mar, en una zona de escasa vegetación y de vientos intensos y constantes. Estas condiciones favorecen el transporte del polvo en suspensión y el aerosol marino, generando una importante deposición seca en la superficie receptora, análogamente a lo que sucede en la superficie del terreno. No obstante, no se descarta algún tipo de contaminación intencionada en las muestras de algunos meses donde la concentración de la mayoría de los iones fue especialmente elevada.

Posiblemente en la zona costera de la vertiente norte o de barlovento de Tenerife se dé un proceso similar al observado en el P1 pero tal vez las aguas de lluvia del P5, que es el más próximo a la costa norte, son menos salinas porque éste se encontraba mucho más resguardado del mar y de los vientos, en una zona de cultivos de plataneras donde el polvo atmosférico también está más limitado.

En el pluviómetro P7 (vertiente sur, 264 m.s.n.m.) se aprecia una concentración relativamente importante de sulfatos disueltos en el agua de lluvia, que no se aprecia en los pluviómetros costeros de la vertiente norte ni en aquellos algo más altos y alejados de la costa de la misma vertiente. Un posible origen de estos sulfatos, además de por el aporte del aerosol marino, puede estar relacionado con algún tipo de contaminación antrópica (i.e. quema de combustibles fósiles) ya que dicho pluviómetro estaba instalado en el núcleo urbano de San Isidro, uno de los principales núcleos poblacionales del sur de Tenerife y que presenta un intenso tráfico de vehículos.

Un fenómeno que se ha observado en casi todos los pluviómetros es el aumento considerable de la carga iónica en las muestras de agua de lluvia tras el periodo de estiaje de 2006 (especialmente las de agosto y septiembre), posiblemente debido a una mayor proporción

de deposición seca respecto a la deposición húmeda durante los meses en que prácticamente no se produjeron precipitaciones, como en los meses de marzo, mayo, junio y julio de 2006.

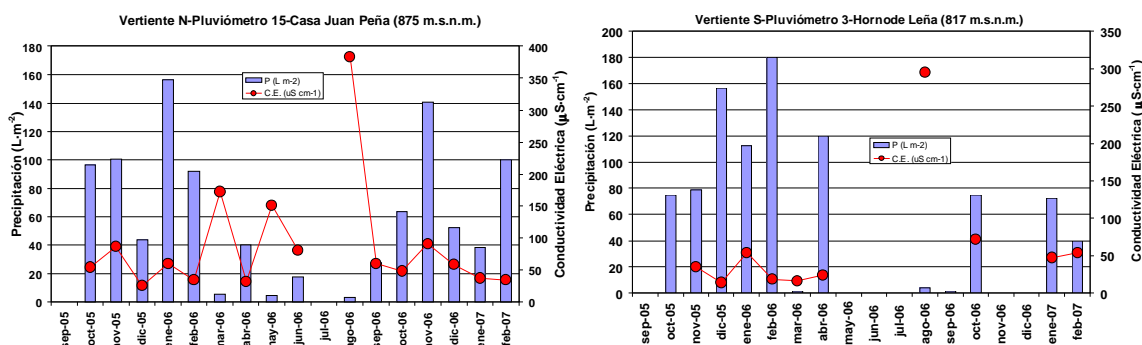


Figura 3.13. Evolución temporal de la precipitación mensual y la conductividad eléctrica de las muestras de agua de lluvia en los pluviómetros P15 (izquierda) y P3 (derecha), ubicados aproximadamente a la misma altura (800 m.s.n.m.) en las vertientes norte y sur de Tenerife, respectivamente. Se puede observar claramente el aumento en la conductividad eléctrica del agua tras el periodo de estiaje.

Este fenómeno de lixiviado de la deposición seca en los colectores de agua de lluvia también se ha observado en otras islas del Archipiélago Canario, como Lanzarote, Fuerteventura o Gran Canaria. En Lanzarote, el agua de lluvia normalmente presenta cantidades de 10 a 15 mg/L de ión cloruro, mientras esa misma agua recogida en un aljibe, con una extensa zona de captación, ha dado hasta 80 mg/L de ese mismo anión, indicando la importancia de la deposición seca en la superficie receptora (Soler y Lozano, 1985). En el Macizo de Betancuria, en Fuerteventura, Herrera (2001) también ha registrado diferencias de más de 3 meq/L en la concentración de sodio y cloruros entre dos muestras de agua de lluvia de un mismo evento, una que incluye la deposición seca y otra en la que se recogió exclusivamente la deposición húmeda.

En la Figura 3.14. se han comparado los contenidos medios ponderados de cloruros en el agua de lluvia a lo largo de los perfiles norte y sur de Tenerife obtenidos en la presente tesis, con los mismos en el agua de lluvia de Gran Canaria, a partir de los datos de Gasparini et al. (1990). Se puede apreciar que el patrón de distribución de la concentración de cloruros en el agua de lluvia es similar en ambas islas, con un incremento de los contenidos conforme disminuye la altitud y la distancia a la costa, aunque es menos acusante en la vertiente norte de Gran Canaria. En dicha isla el agua de lluvia de la vertiente norte tiene una concentración de cloruros cuantitativamente más alta que la vertiente sur, al contrario de lo que se observa en Tenerife. Estas diferencias entre vertientes de una y otra isla posiblemente radiquen en el corto periodo de muestreo empleado en ambos estudios, lo que impide caracterizar correctamente la variación espacial, así como la diferente distancia al mar y/o la mayor o menor exposición orográfica del lugar de muestreo a los vientos que transportan partículas solubles en suspensión.

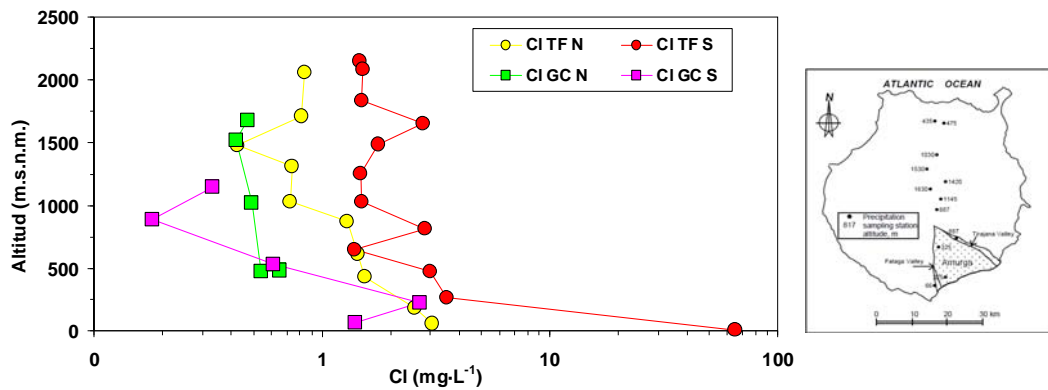


Figura 3.14. Variación de la concentración promedio ponderada mensual de cloruros en el agua de lluvia respecto a la altitud en ambas vertientes de Tenerife (TF) obtenida en la presente tesis. También se ha representado dicha variación en las aguas de lluvia de Gran Canaria (GC) en las vertientes norte y sur de la isla (ver ubicación de los puntos de muestreo en el mapa insertado, de Custodio, 2009a), a partir de los datos de Gasparini et al. (1990).

Los resultados de la composición química media ponderada del agua de lluvia de cada pluviómetro también han sido representados en un diagrama de Piper junto a la composición química promedio del agua de mar (Figura 3.15.).

DIAGRAMA DE PIPER

Composición química ponderada de las precipitaciones

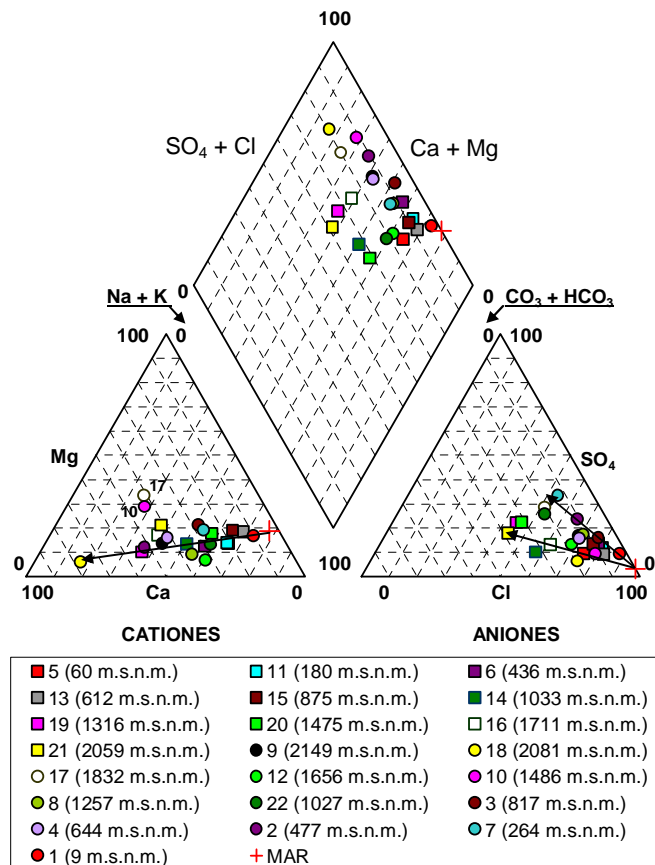


Figura 3.15. Diagrama de Piper de la composición química media ponderada de las muestras de agua de lluvia de los pluviómetros instalados en la presente tesis y de la composición química media del mar (según Goldberg, 1963). Círculos: vertiente sur; cuadrados: vertiente norte. Ver texto para más explicación.

En este diagrama se puede observar claramente cómo la mayor parte de las aguas de lluvia se distribuyen a lo largo de unas líneas de mezcla que unen las muestras con una mayor influencia del aporte del aerosol marino, con una composición química similar a la del mar, con aquellas muestras con una mayor influencia del polvo atmosférico donde la proporción de otros iones como Ca^{+2} , SO_4^{-2} y HCO_3^- aumenta en detrimento de los primeros (representadas por los pluviómetros P7, P18 y P21). Por tanto, las flechas negras en la Figura 3.15. marcan posibles líneas de incorporación de solutos sólidos o de deposición húmeda.

Los únicos pluviómetros en donde la composición química catiónica del agua de lluvia no se encuentra a lo largo de la línea de mezcla son el P17 y el P10, ambos de las zonas altas de la vertiente sur. Aunque su contenido iónico es muy bajo (Figura 3.12.) y no se descarta un posible error analítico, es probable que la relativamente elevada concentración de magnesio se deba a un aporte de polvo local.

■ **Cuantificación de la deposición total (*D*) y de la aportación atmosférica o tasa de deposición total (*A*)**

Para cuantificar el aporte salino del agua de lluvia al acuífero fue necesario determinar tanto la deposición (*D*) como la tasa de deposición o aportación atmosférica (*A*) de cada ión en cada pluviómetro. La deposición (húmeda, seca o total) es la cantidad de una cierta sustancia depositada sobre el terreno (representado por la superficie en planta del embudo) en un cierto intervalo de tiempo (se mide normalmente en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ó $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), mientras que la aportación atmosférica o tasa de deposición total es dicha cantidad por unidad de tiempo; se expresa normalmente en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ (Alcalá, 2006; Alcalá y Custodio, 2008a).

En este trabajo, dado que las muestras de agua de lluvia se tomaron por medio de pluviómetros abiertos, el término *D* corresponde con la deposición total, ya que incluye el aporte de solutos disueltos en el agua de precipitación (deposición húmeda) más los aportados por el polvo atmosférico, depositados sobre el embudo y lavados por la propia lluvia (deposición seca).

En general, antes de tomar la muestra del recipiente contenedor y tras medir el volumen precipitado en cada periodo, en la mayoría de trabajos publicados se lava el colector con un volumen conocido de agua ultrapura, para incorporar a la muestra la deposición seca (polvo atmosférico) acumulada en el embudo y así contabilizarlo como deposición total perteneciente a ese periodo, al mismo tiempo que aseguran que el muestreo posterior sólo incluye el contenido salino del propio periodo (i.e. Alcalá, 2006; Alcalá y Custodio, 2008a). Sin embargo en la presente tesis, dado que en la misma muestra de lluvia también había que tomar una alícuota para determinar el contenido isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , no se lavó el embudo con agua destilada previamente para añadir la deposición seca porque de esa manera se podía modificar dicho contenido isotópico. Por tanto, el contenido salino del agua de lluvia analizado sólo representa el propio de un periodo cuando se han producido precipitaciones en el periodo anterior que hayan lavado la deposición seca. En caso contrario, éste comprenderá la deposición

húmeda y seca del propio periodo más la fracción seca de aquellos periodos previos en que no se hayan producido precipitaciones.

Para cuantificar correctamente la deposición total (D) de cada ión en un intervalo de tiempo (Δt) en un pluviómetro (que se extrapola a una superficie dada) se aplicó la siguiente ecuación modificada de Alcalá y Custodio (2008a):

$$D_i(g \cdot m^{-2}) = \frac{C_i(g \cdot L^{-1})}{S_c(m^2)} [V_{L_i}(mL)] \frac{1L}{1000mL} \quad [3.6.]$$

donde C_i es la concentración en el agua de lluvia de cada ión en un intervalo temporal i ; S_c es la superficie del embudo colector del pluviómetro; V_{L_i} es el volumen de precipitación almacenada en el intervalo i . Siendo S_c conocido ($0,02 \text{ m}^2$), a partir de los valores de V_{L_i} y C_i , se ha podido estimar la deposición total (D_i) de los diversos iones en cada uno de los intervalos temporales considerados de cada pluviómetro (ver Tabla A.3.2.). La suma en todos estos intervalos temporales permite obtener la deposición total producida en cada pluviómetro durante todo el periodo considerado (ΣD en la Tabla 3.4.).

Para determinar la aportación atmosférica o tasa anual de deposición total (A), se divide la deposición total registrada entre la duración del registro temporal en años:

$$A(g \cdot m^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) = \sum_{i=1}^n D_i(g \cdot m^{-2}) \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i(\text{días}) \right)^{-1} \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \quad [3.7.]$$

donde n es el número de intervalos de muestreo contabilizados en cada pluviómetro; $\sum_{i=1}^n D_i$ es el valor acumulado para todo el periodo de observación en cada pluviómetro de la deposición total de cada intervalo i . En el caso de los cloruros, sulfatos y sodio, a la hora de realizar los cálculos de la deposición total (D) y de la aportación atmosférica (A), se han utilizado los datos de todos los análisis, no sólo de aquellos cuyo IBE está entre $\pm 20 \%$, ya que la concentración de dichos iones no se suele ver afectada por cambios en el pH o por la presencia en el agua de sustancias orgánicas no analizadas que pueden ser las responsables del alto error observado (WMO, 2004).

Tabla 3.4. Deposición atmosférica total (ΣD , en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) y aportación o tasa anual de deposición (A , en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de cada ión en los 22 pluviómetros. También se ha incluido la cota, distancia al mar y la cumbre, vertiente (V), precipitación total (ΣP_i) y número de días totales de observación ($\Sigma \Delta t_i$) en cada pluviómetro.

Nº	Cota (m.s.n.m.)	Distancia a la cumbre (m)	Distancia al mar (m)	V	ΣP_i (mm)	$\Sigma \Delta t_i$ (días)	ΣD Na	ΣD K	ΣD Ca	ΣD Mg	ΣD Cl	ΣD HCO ₃	ΣD SO ₄	A	A	A	A	A	A	A
														Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
P5	60	10329	165	Norte	449,4	314	7,7	0,5	2,2	0,8	13,2	4,4	2,3	9,0	0,6	2,5	1,0	15,3	5,1	2,6
P11	180	9272	1222	Norte	553,3	314	5,7	0,6	2,1	0,8	9,3	4,5	1,6	6,6	0,7	2,4	0,9	10,8	5,2	1,9
P6	436	8460	2034	Norte	698,9	433	7,8	0,7	3,3	0,8	13,2	4,8	3,4	6,6	0,6	2,8	0,7	11,1	4,1	2,9
P13	612	7197	3297	Norte	644,3	451	4,7	0,6	0,8	0,6	10,2	4,3	2,0	3,8	0,5	0,6	0,5	8,2	3,5	1,6
P15	875	6736	3758	Norte	842,7	496	5,2	0,7	1,1	0,8	10,1	4,6	3,2	3,9	0,5	0,8	0,6	7,4	3,4	2,3
P14	1033	4476	6018	Norte	936,4	354	3,8	0,7	1,9	0,5	7,6	9,8	1,8	3,9	0,7	2,0	0,5	7,8	10,1	1,9
P19	1316	3760	6734	Norte	630,8	292	1,6	0,2	0,7	0,2	3,6	7,4	1,6	2,0	0,3	0,9	0,3	4,5	9,3	2,0
P20	1475	3028	7466	Norte	948,0	390	2,2	0,6	0,6	0,3	3,6	6,9	1,2	2,0	0,5	0,6	0,3	3,3	6,4	1,1
P16	1711	2733	7761	Norte	738,5	270	1,7	0,5	0,7	0,2	3,5	10,0	1,3	2,3	0,6	0,9	0,3	4,7	13,5	1,7
P21	2059	0	10494	Norte	857,5	325	1,8	0,6	1,4	0,4	4,1	9,8	2,2	2,0	0,7	1,6	0,5	4,7	11,0	2,5
		Promedio		Norte			4,2	0,6	1,5	0,6	7,8	6,7	2,1	4,2	0,6	1,5	0,6	7,8	7,2	2,1
P1	9	18593	134	Sur	257,1	251	20,6	0,8	3,8	2,6	30,7	7,5	4,6	29,9	1,2	5,5	3,7	44,7	10,9	6,6
P7	264	13914	4813	Sur	436,9	221	4,1	0,4	1,8	0,8	7,4	3,1	6,0	6,7	0,6	3,0	1,3	12,1	5,1	10,0
P2	477	12268	6459	Sur	334,7	276	2,8	0,9	2,4	0,4	7,5	3,0	2,6	3,7	1,2	3,1	0,5	9,9	4,0	3,4
P4	644	9769	8958	Sur	741,5	398	2,7	0,5	1,7	0,4	6,7	6,5	2,3	2,5	0,5	1,6	0,4	6,2	5,9	2,1
P3	817	9261	9466	Sur	761,4	362	4,2	0,6	3,0	0,9	9,0	6,6	3,4	4,3	0,6	3,0	0,9	9,1	6,7	3,4
P22	1027	7402	11325	Sur	557,1	188	1,9	0,4	0,4	0,2	3,0	8,4	1,8	3,7	0,7	0,8	0,4	5,7	16,4	3,4
P8	1257	6862	11865	Sur	889,4	312	3,5	0,9	1,6	0,3	8,0	6,8	3,2	4,1	1,1	1,9	0,4	9,3	7,9	3,8
P10	1486	6412	12315	Sur	683,3	361	1,3	0,5	1,0	0,4	5,7	5,4	1,7	1,3	0,5	1,0	0,4	5,7	5,5	1,7
P12	1656	5129	13598	Sur	879,5	313	4,3	0,4	1,8	0,3	7,8	8,7	2,9	5,0	0,5	2,1	0,3	9,1	10,2	3,4
P17	1832	6042	12685	Sur	764,9	300	4,6	0,6	1,1	0,4	3,1	11,1	1,5	5,6	0,7	1,4	0,5	3,7	13,5	1,8
P18	2081	5861	12866	Sur	751,3	265	1,2	0,4	1,1	0,1	3,8	7,1	1,2	1,6	0,5	1,5	0,2	5,2	9,8	1,7
P9	2149	0	18727	Sur	840,7	334	1,8	0,4	4,5	0,5	6,2	7,2	2,0	2,0	0,5	4,9	0,5	6,8	7,9	2,1
		Promedio con P1		Sur			4,4	0,6	2,0	0,6	8,2	6,8	2,8	5,9	0,7	2,5	0,8	10,6	8,6	3,6
		Promedio sin P1		Sur			3,0	0,5	1,9	0,4	6,2	6,7	2,6	3,7	0,7	2,2	0,5	7,6	8,4	3,4

En la Tabla 3.4. se representan todos los valores de la aportación atmosférica (A) en cada pluviómetro así como los valores promedio de cada vertiente. En dicha tabla se observa que los máximos valores de A de prácticamente todos los iones se obtiene en el P1.

La aportación atmosférica (A) más importante es en forma de iones Na, Cl y HCO_3 . La aportación atmosférica A promedio de cada ión es siempre mayor en la vertiente sur o de sotavento que en la vertiente norte o de barlovento, debido en parte a la influencia de los altísimos valores obtenidos en el P1. Para determinar la influencia del P1 en el valor promedio de A de los diferentes iones, éste fue nuevamente calculado sin tener en cuenta los datos de dicho pluviómetro (Tabla 3.4.). Los nuevos valores promedios de A para los iones K, Ca, HCO_3 y SO_4 siguen siendo mayores en la vertiente sur, mientras que en los iones Na, Cl y Mg los valores promedio de A en la vertiente norte son sólo algo más elevados.

Para determinar la variación espacial de la aportación atmosférica, se ha calculado tanto el gradiente altitudinal como longitudinal (con la distancia a la cumbre o a la costa) en ambas vertientes de Tenerife. Para determinar los gradientes de la vertiente sur, en los respectivos ajustes no se ha tenido en cuenta el dato del P1 dado que los valores de la aportación atmosférica son mucho más elevados, haciendo que los ajustes, en caso de tomar también dicho valor, sean poco representativos. En la Figura 3.16. se ha representado la aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (A_{Cl}) frente a la altitud o cota de cada pluviómetro y en función de la vertiente. Se obtuvo un gradiente negativo de deposición lineal (ΔA_{Cl}) en ambas vertientes, que fue de $0,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100^{-1} \text{ m}$ de altitud ($r^2=0,81$) en la vertiente norte (línea amarilla) y de $0,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100^{-1} \text{ m}$ de altitud ($r^2=0,40$) en la vertiente sur (línea roja).

En la Figura 3.16. se aprecia un posible cambio de gradiente en la tasa de deposición total de cloruros en ambas vertientes por debajo de los 700 m.s.n.m. Por tanto, se obtiene un gradiente altitudinal para la zona por debajo de los 700 m.s.n.m., que es de aproximadamente $1,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100^{-1} \text{ m}$ de altitud y otro gradiente para la zona de medianías y cumbre por encima de dicha altitud que es de $0,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100^{-1} \text{ m}$. Este posible incremento de la pendiente en la franja costera quizás está relacionado con las diferentes condiciones climáticas respecto a las zonas más elevadas de la isla, aumentando la deposición atmosférica de cloruros debido a las mayores temperaturas, menores precipitaciones, proximidad al mar, etc..

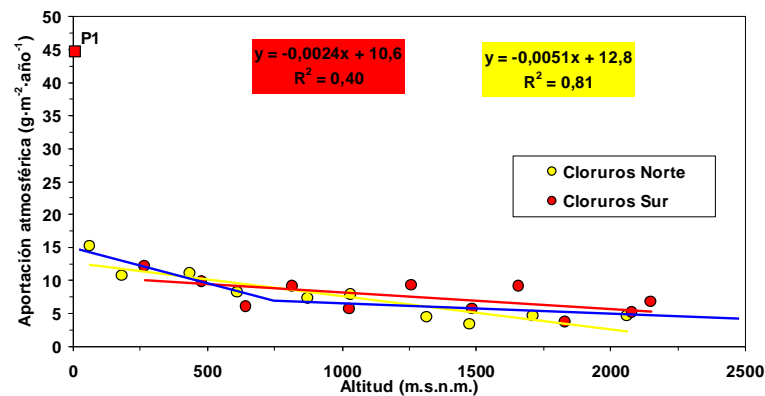


Figura 3.16. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) respecto a la altitud o cota de cada pluviómetro, en las vertientes norte y sur de Tenerife. También se han representado el valor del pluviómetro P1 (cuadrado rojo), las líneas de tendencias que marcan los gradientes altitudinales y los coeficientes de regresión (R^2) para las serie de valores de cada vertiente (líneas roja y amarilla), así como la posible existencia de un aumento del gradiente en ambas vertientes por debajo de los 700 m.s.n.m. (línea azul).

En la presente tesis también se ha calculado el gradiente longitudinal de la aportación atmosférica de cloruros con la distancia lineal a la cumbre (ΔA_C^*), tomando como tal los pluviómetros de mayor altitud para cada vertiente (P21 y P9 para las vertiente norte y sur, respectivamente) (Tabla 3.5. y Figura 3.17.). Los gradientes longitudinales (ΔA_C^*) obtenidos para la vertiente norte y sur de Tenerife fueron de $1,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ y de $0,4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, respectivamente si bien el ajuste por mínimos cuadrados del gradiente longitudinal es, al igual que en el caso del gradiente altitudinal, mucho mejor para la vertiente norte ($r^2=0,8$).

En la Figura 3.17. también se puede trazar un posible cambio en el gradiente longitudinal en ambas vertientes (líneas verde clara y verde oscura), aunque en este caso la inflexión en el gradiente se produce en la vertiente norte a menor distancia de la cumbre que en la vertiente sur. Esta diferencia posiblemente se debe a un efecto orográfico ya que la vertiente norte es más corta (10,33 km) y por tanto con mayor pendiente que la vertiente sur (18,59 km), la cual presenta una disminución de la pendiente por debajo de los 700 m de altitud (ver Figura 3.12.).

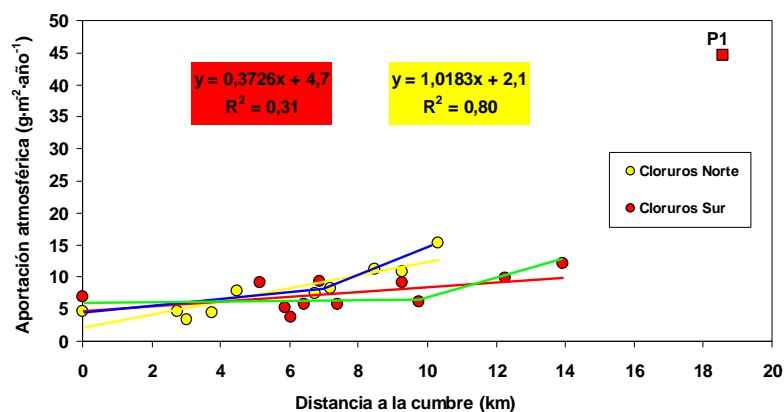


Figura 3.17. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) respecto a la distancia a la cumbre en las vertientes norte y sur de Tenerife. También se han representado el valor del P1 (cuadrado rojo) y las líneas de tendencias que marcan los gradientes longitudinales (líneas roja y amarilla) y los coeficientes de regresión (R^2) para las serie de valores de cada vertiente, así como la posible existencia de un aumento del gradiente (línea verde clara, norte verdes; línea verde oscuro, sur).

■ Discusión

A partir de la presente tesis se ha observado que en general la conductividad eléctrica así como el contenido aniónico y catiónico mayoritario de las aguas de lluvia se distribuye de manera similar en ambas vertientes de Tenerife, disminuyendo considerablemente con la altura y la distancia a la costa, indicando que la influencia marina es la principal responsable del contenido iónico de las lluvias, sin poder diferenciar si este proceso ha tenido lugar durante la caída de la gota de lluvia por interacción con el aerosol marino o al disolver la deposición seca en el propio pluviómetro. No obstante, en la vertiente norte o de barlovento (que corresponde al acuífero de Las Cañadas) el contenido iónico ponderado de las aguas de lluvia parece ser menor y más homogéneo que en la vertiente sur. Este efecto se puede deber a la mayor intensidad y frecuencia con la que soplan los vientos alisios en la vertiente sur respecto a la vertiente norte, que unido a la escasa vegetación favorece el transporte y deposición en los colectores no sólo del aerosol marino sino también del polvo atmosférico.

Considerando el contenido promedio de iones en las aguas de lluvia muestreadas en cada pluviómetro, se observa que la composición química de las precipitaciones en Tenerife varía desde un extremo Na-Cl dominado por la contribución marina hasta otro extremo dominado por el aporte de polvo atmosférico (tanto local como regional) donde la proporción de otros iones como Ca^{+2} y HCO_3^- aumenta, en detrimento de los primeros.

El rango de valores de la aportación atmosférica de cloruros (A_{Cl}) calculado en la presente tesis para todo el periodo de observación está entre 3,3 y 15,3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, si no se tienen en cuenta los datos del pluviómetro P1 que representa un valor anómalo en la tendencia general. Este rango es del mismo orden en ambas vertientes y sigue el mismo patrón, disminuyendo con la altitud y, por lo tanto, la distancia a la costa. El rango de valores de la aportación atmosférica de cloruros también es muy similar al que se obtiene en Gran Canaria o Fuerteventura (Tabla 3.5.).

Tabla 3.5. Aportación atmosférica o tasa de deposición total de cloruros (A_{Cl}) y gradientes altitudinal (ΔA_{Cl}) y longitudinal de la misma (ΔA_{Cl}^*) obtenidas en el Archipiélago Canario. N°: número de estaciones meteorológicas o pluviómetros. TF: Tenerife; FTV: Fuerteventura; GC: Gran Canaria.

Localización	N°	A_{Cl} ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$)	ΔA_{Cl} ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$)	ΔA_{Cl}^* ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)	Fuente
Vertiente Norte, TF	10	3,3-15,3	0,5	1,0	Este trabajo
Vertiente Sur, TF	12	3,7-(12,1)-44,7 [#]	0,2	0,4	Este trabajo
Zona central, FTV	8	5-10 ^a	-	0,5-2 ^b	^a Herrera, 2001 ^b Alcalá, 2006
Vertiente Norte, GC	-	8,1-17,7	-	-	Gasparini, 1984 (en Custodio, 2009a)
Vertiente Oeste, GC	3	1,9-17,1 ^a	3,3-5,5 ^a	0,5->3 ^b	^a Muñoz, 2005 ^b Alcalá, 2006
Vertiente Sur, GC	1	1,1	-	-	Alcalá, 2006

[#]El valor de 44,7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, perteneciente al P1, está fuera del rango del resto de valores.

Los gradientes altitudinales de la aportación atmosférica de cloruros (ΔA_{Cl}) obtenidos en la vertiente norte (0,5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$) y en la vertiente sur (0,2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot 100 \text{ m}^{-1}$) de Tenerife son relativamente más bajos que aquellos con los que se ha podido comparar pertenecientes a la zona de La Aldea de San Nicolás, en la vertiente occidental de la

vecina isla de Gran Canaria (Tabla 3.5.) (Muñoz, 2005). Una posible explicación es que mientras en Gran Canaria sólo hay datos de la vertiente occidental y el pluviómetro más elevado se encontraba a tan sólo 338 m.s.n.m., por tanto, en condiciones climáticas áridas o semi-áridas, en Tenerife se disponía de pluviómetros ubicados en las vertientes norte y sur de la isla y cada 200 metros de altitud hasta los 2150 m.s.n.m., lo que permite una mayor diversidad en los regímenes pluviométricos así como de los factores y procesos que afectan al contenido en cloruros de la precipitación (mayor o menor exposición al efecto costero, intensidad y dirección de los vientos, etc.).

Los gradientes longitudinales de la aportación atmosférica de cloruros con la distancia lineal a la cumbre (ΔA_{Cl}^*) para la vertiente norte ($1,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) y la vertiente sur ($0,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) de Tenerife, presentan unos valores similares tanto a los calculados por diferentes autores para Fuerteventura, como a los obtenidos por Alcalá (2006) para la vertiente occidental de Gran Canaria (Tabla 3.5.).

3.5. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN

■ Datos isotópicos utilizados

Debido a problemas técnicos con el Espectrómetro de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS) del laboratorio del ITER, para el presente trabajo de investigación sólo se pudo realizar el análisis de la composición isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ y del δD en 50 de las 200 muestras de agua de lluvia recolectadas entre los meses de septiembre de 2005 y febrero de 2007. De los 50 pares isotópicos disponibles, que corresponden a los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2005, 23 de ellos pertenecen a la vertiente norte y 27 a la vertiente sur de Tenerife (Tabla 3.6.).

Tabla 3.6. Composición isotópica del agua de lluvia de Tenerife perteneciente a los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2005. El número (Nº) del pluviómetro coincide con el de la Tabla 3.1.; V: vertiente norte (N) y sur (S); P: precipitación (en mm o $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$); Z: cota del pluviómetro (en m.s.n.m.); δD y $\delta^{18}\text{O}$ se expresa como ‰ vs V-SMOW; d: exceso de deuterio según la ecuación $d=\delta\text{D}-8\cdot\delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964). Valores en negrita: descartados por posible evaporación en la caída (ver más explicación en el texto).

Nº	V	Fecha	P	Z	δD	$\delta^{18}\text{O}$	d
P11	N	sep-05	1,2	180	2,7	-0,4	5,9
P6	N	sep-05	3,6	436	-0,9	-1,4	10,3
P15	N	sep-05	0,2	875	3,6	-0,4	6,8
P14	N	sep-05	0,2	1033	-1,9	-1,5	10,1
P1	S	sep-05	21,1	9	-39,8	-5,6	5,0
P7	S	sep-05	0,4	264	0,8	-0,9	8,0
P2	S	sep-05	52,5	477	-52,2	-7,4	7,0
P4	S	sep-05	0,7	644	-1,3	-1,3	9,1
P5	N	oct-05	45,1	60	-21,4	-4,0	10,8
P11	N	oct-05	72,8	180	-23,5	-4,9	15,3

Nº	V	Fecha	P	Z	δD	$\delta^{18}O$	d
P6	N	oct-05	91,3	436	-23,1	-5,0	16,8
P13	N	oct-05	47,8	612	-45,5	-7,2	11,7
P15	N	oct-05	96,3	875	-29,3	-5,5	14,5
P14	N	oct-05	83,1	1033	-37,2	-6,7	16,0
P20	N	oct-05	56,5	1475	-56,1	-8,7	13,8
P16	N	oct-05	46,0	1711	-60,4	-8,9	10,9
P21	N	oct-05	40,5	2059	-74,2	-11,0	13,7
P1	S	oct-05	41,9	9	-18,1	-3,3	7,9
P7	S	oct-05	25,7	264	-14,3	-2,7	7,1
P2	S	oct-05	32,7	477	-29,0	-5,4	14,3
P4	S	oct-05	37,2	644	-32,5	-5,4	10,8
P3	S	oct-05	43,9	817	-30,3	-5,4	12,8
P22	S	oct-05	42,6	1027	-39,6	-6,5	12,6
P8	S	oct-05	36,1	1257	-52,2	-8,2	13,0
P10	S	oct-05	46,4	1486	-54,1	-8,2	11,8
P12	S	oct-05	53,4	1656	-66,7	-10,0	13,4
P17	S	oct-05	17,6	1832	-28,6	-4,1	3,9
P18	S	oct-05	62,9	2081	-63,5	-9,6	13,3
P9	S	oct-05	74,5	2149	-71,9	-9,8	6,5
P5	N	nov-05	5,4	60	-35,2	-5,3	7,3
P11	N	nov-05	28,4	180	-14,8	-3,6	13,9
P6	N	nov-05	38,0	436	-15,0	-3,9	16,3
P13	N	nov-05	70,0	612	-15,4	-3,9	15,9
P15	N	nov-05	100,5	875	-25,1	-5,7	20,1
P14	N	nov-05	104,5	1033	-41,0	-7,1	16,1
P19	N	nov-05	23,2	1316	-33,9	-6,8	20,1
P20	N	nov-05	99,0	1475	-49,6	-8,3	17,1
P16	N	nov-05	104,5	1711	-45,2	-8,0	18,7
P21	N	nov-05	64,0	2059	-42,5	-7,2	15,1
P1	S	nov-05	13,6	9	-0,8	-1,4	10,1
P7	S	nov-05	27,5	264	-9,9	-3,1	14,7
P2	S	nov-05	37,5	477	-8,8	-2,6	11,7
P3	S	nov-05	54,4	817	-12,9	-3,7	16,5
P22	S	nov-05	85,5	1027	-20,3	-4,5	16,0
P8	S	nov-05	65,7	1257	-28,4	-5,2	13,1
P10	S	nov-05	71,0	1486	-32,0	-6,6	21,1
P12	S	nov-05	105,0	1656	-38,8	-6,6	14,3
P17	S	nov-05	93,5	1832	-38,9	-6,7	14,3
P18	S	nov-05	65,0	2081	-45,3	-7,5	14,4

Con el fin de realizar un estudio lo más completo posible, en la presente tesis no sólo se han utilizado los resultados procedentes de los 22 pluviómetros instalados, sino que también se han usado datos procedentes de publicaciones previas. Entre los años 1972 y 1985

diferentes autores determinaron la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las precipitaciones (en forma de lluvia y nieve) en Tenerife (Gonfiantini, 1973; Custodio et al., 1987; Albert-Beltran et al., 1990). En la Tabla 3.7. se presenta un resumen de los resultados recopilados:

Tabla 3.7. Composición isotópica de las precipitaciones de Tenerife publicadas en diferentes trabajos. V: vertiente, C: cumbre, S: sur, SE: sureste; N: norte, NE: noreste; Tipo: L: lluvia, N: nieve; δD y $\delta^{18}\text{O}$ se expresa como ‰ vs V-SMOW; d: exceso de deuterio. Valores en negrita: descartados por posible evaporación en la caída. Fuentes: A: Gonfiantini, 1973 (SPA-15); B: Custodio et al., 1987; C: Albert-Beltran et al., 1990.

Nº	Nombre original	V	Tipo	Longitud	Latitud	Altitud	Fecha	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	Fuente
				UTM (m)	UTM (m)	(m.s.n.m.)					
23	Teide*	C	L	338884	3128510	3650	feb-72	-8,03	-51,5	12,7	A
24	Las Cañadas	S	L	339302	3121927	2007	feb-72	-5,82	-34,4	12,2	A
25	Las Cañadas*	S	L	339302	3121927	2007	may-72	-7,97	-45,8	18,0	A
26	Montaña Roja	S	L	347935	3101447	131	feb-72	-5,84	-26,0	20,7	A
27	Montaña Roja	S	L	347935	3101447	131	mar-72	-5,46	-22,6	21,1	A
28	Montaña Roja	S	L	347935	3101447	131	abr-72	-5,40	-27,4	15,8	A
29	Montaña Roja	S	L	347935	3101447	131	jun-72	-6,90	-45,2	10,0	A
30	Arona	S	L	335244	3131432	682	feb-72	-5,95	-25,8	21,8	A
31	Arona	S	L	335244	3131432	682	abr-72	-3,62	-12,4	16,6	A
32	Santa Cruz	SE	L	377026	3149231	35	feb-72	-2,99	-21,2	2,7	A
33	Santa Cruz	SE	L	377026	3149231	35	abr-72	0,17	6,5	5,1	A
34	Santa Cruz, R1	SE	L	377026	3149231	35	1985	-5,51	-34,6	9,5	B
35	Los Rodeos, R2	NE	L	368748	3151347	625	1985	-4,98	-22,6	17,2	B
36	Pedro Álvarez, R2	NE	L	372788	3156459	825	1985	-3,68	-14,3	15,1	B
37	La Tabona, R4*	N	L	336328	3141705	155	1985	-5,48	-25,4	18,4	B
38	Montaña Roja, R5	S	L	347935	3101447	131	1985	-6,13	-32,6	16,4	B
39	Ucanca, R6*	S	L	339302	3121927	2010	1985	-7,78	-49,3	12,9	B
40	Izaña, S1*	C	N	351476	3132152	2210	1985	-5,33	-28,8	13,8	B
41	Ladera Teide, S2*	C	N	339457	3127399	3090	1985	-6,95	-37,2	18,4	B
42	Cráter Teide, S3*	C	N	338890	3128490	3700	1985	-8,26	-46,1	20,0	B
43	Teide Cráter	C	L	338884	3128510	3717	nov-84	-7,20	-39,4	18,2	C
44	Montaña Blanca*	C	L	341807	3127162	2400	nov-84	-5,95	-32,2	15,4	C

*Usados para determinar el gradiente altitudinal (ver más explicación en el texto)

Es importante destacar que en los datos de las publicaciones previas hay muestras de precipitaciones que no pertenecen a ninguna de las dos vertientes anteriormente nombradas ya que fueron tomadas en la zona noreste de la isla, alejadas de la zona de estudio (Figura 3.18.). Éstas han sido agrupadas en la Tabla 3.7. como muestras de las vertientes sureste (SE) y noreste (NE). Además también hay 3 muestras de precipitaciones en forma de nieve que junto con aquellas de agua de lluvia tomadas en el Complejo Volcánico Teide-Pico Viejo, es decir, a cotas que oscilan entre los 2400 y los 3717 m.s.n.m. (que es la altura máxima del cono de cumbre del Teide) se han agrupado como de la zona de "cumbre" (C).

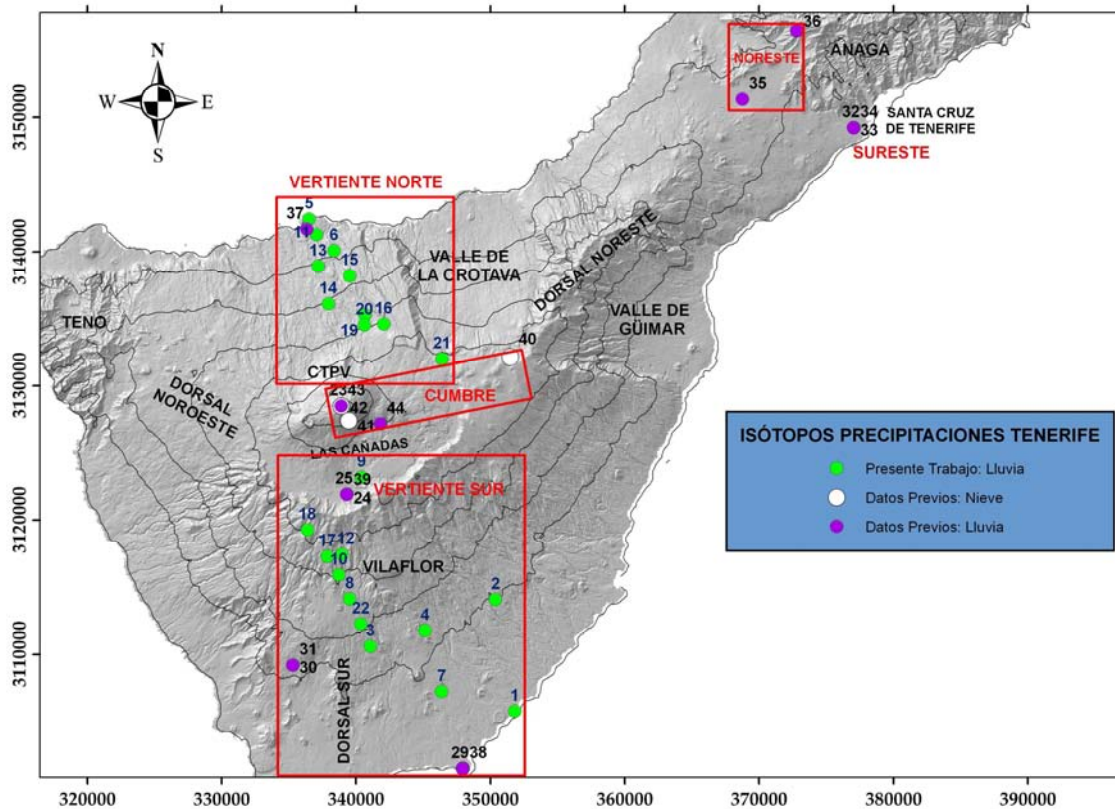


Figura 3.18. Mapa de situación de todas las muestras (de la presente tesis y de trabajos previos) de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}O$ en las precipitaciones de Tenerife, separadas en función de su ubicación en 5 grupos: vertiente norte, vertiente sur, cumbre, noreste y sureste. Los números y los grupos corresponden con los de las Tablas 3.6. y 3.7. Líneas negras: curvas de nivel cada 500 m. Proyección UTM (m), WGS84, 28N.

■ Exceso de deuterio (d) y efecto de cantidad de precipitación

Para caracterizar en condiciones adecuadas la composición isotópica de las precipitaciones de Tenerife se ha utilizado el exceso de deuterio (Dansgaard, 1964). Se denomina exceso de deuterio al parámetro d que se obtiene al sustituir los contenidos isotópicos de las precipitaciones en la ecuación $d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$ (Dansgaard, 1964). Por tanto, a nivel mundial d es igual +10‰ (Craig, 1961). El valor de d se adquiere durante la evaporación y, salvo evaporación, no cambia significativamente en la evolución de las nubes (Jiménez-Martínez y Custodio, 2008). El valor de d expresa en origen el fraccionamiento cinético medio en el área de generación del vapor atmosférico. Por lo tanto, el valor de d en el agua de lluvia es característico del lugar donde se forman: las lluvias atlánticas están caracterizadas por d comprendido entre +8,9 ‰ y +12 ‰, con un promedio de +10 ‰, mientras que las lluvias mediterráneas muestran un contenido más pesado, entre +18 a +22 ‰ en la parte oriental y de +13 a +15 ‰ en la occidental (Dansgaard, 1964; Gat y Carmi, 1970; Gat, 1981; Jiménez-Martínez y Custodio, 2008). El valor de d es usado frecuentemente como un índice de evaporación del agua de lluvia ya que depende principalmente de la temperatura y de la humedad relativa existente durante el proceso de evaporación, siendo más alto cuanto más elevada sea la temperatura y la sequedad del ambiente.

En la Figura 3.19. se han representado todos los datos de la composición isotópica de las precipitaciones (agua de lluvia y nieve) disponibles para Tenerife y las rectas de pendiente 8 y diferentes valores del exceso de deuterio (d):

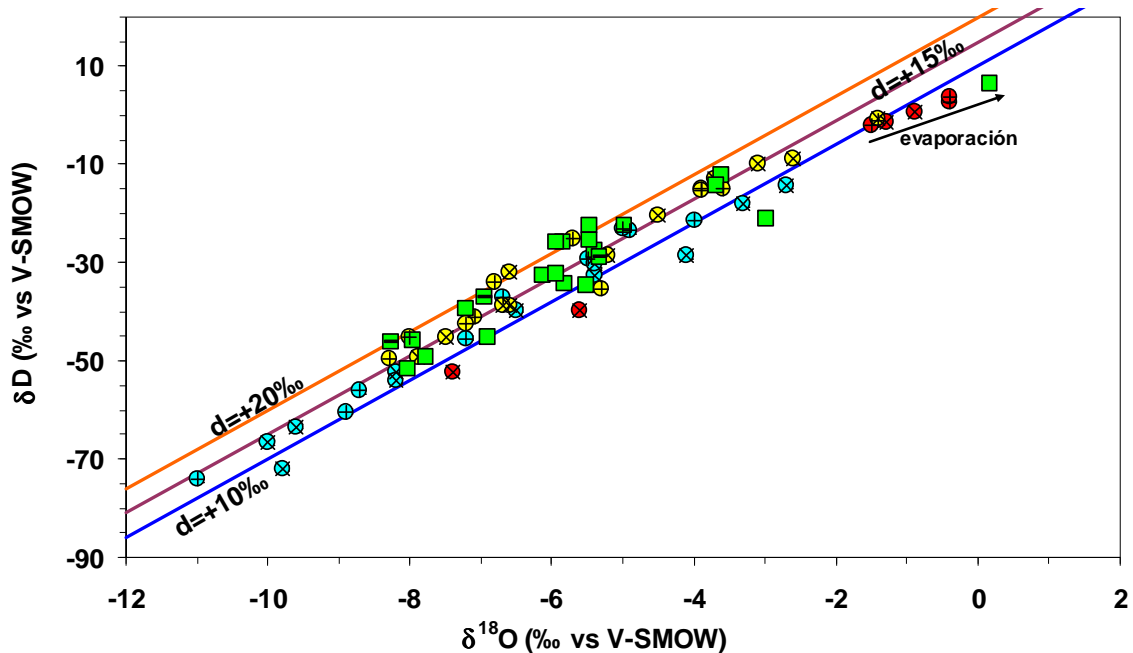


Figura 3.19. Relación de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}O$ en las precipitaciones de Tenerife. Cuadrados verdes: datos (nieve con signo "-") de estudios previos; Círculos: lluvia de septiembre (rojo), octubre (azul) y noviembre (amarillo) de 2005 obtenidos en la presente tesis (vertientes norte: + y sur: x).

En la Figura 3.19. se puede observar cómo la mayor parte de las precipitaciones de Tenerife presentan un exceso de deuterio (d) entre $+10\text{‰}$ y $+20\text{‰}$. En un ambiente atlántico típico, teóricamente el exceso de deuterio debería ser aproximadamente de $d=+10\text{‰}$ (Daansgard, 1964). Sin embargo en Canarias el ambiente es más seco dada su cercanía al continente africano, aumentando el efecto de fraccionamiento cinético en la generación del vapor. Por tanto, el valor de d en Canarias tiene un valor medio de $+14\text{‰}$ (Jiménez-Martínez y Custodio, 2008). En la presente tesis, tomando todos los valores se obtuvo un valor promedio de $d=+13,4\text{‰}$ que concuerda con lo esperado para esta región, aunque como se verá más adelante, tras una serie de correcciones el valor más representativo es el de $d=+15,5\text{‰}$.

En la Figura 3.19. también se aprecia que algunas muestras tienen un $d < +10\text{‰}$, indicando que posiblemente han sufrido un proceso de evaporación. Dada la existencia de una capa de parafina líquida ($>1\text{ cm}$ de espesor) en el interior del depósito del pluviómetro, se descarta que dicha evaporación se haya producido durante el periodo de almacenamiento en el colector. Por tanto, este fenómeno ha sido interpretado como consecuencia del intercambio isotópico durante la caída y se produce por la diferencia entre la composición isotópica de las gotas de lluvia y la humedad ambiental, en el que el déficit de humedad atmosférica se compensa con la evaporación de las gotas de lluvia, sobre todo en lluvias cortas poco

abundantes, lo que produce un fraccionamiento isotópico. Al ser un proceso no equilibrado, éste no tiene lugar a lo largo de la recta meteórica local sino formando una línea de evaporación con pendiente menor de 8 (Veeger, 1991).

Este proceso suele estar relacionado con el efecto de cantidad de lluvia, ya que en el caso de las lluvias de menor intensidad el gradiente existente con la humedad ambiente es capaz de producir evaporación y consecuente fraccionamiento en las gotas de lluvia (Custodio y Llamas, 1976, 1983). Para comprobar el efecto de cantidad de lluvia se ha representado la composición isotópica mensual de las precipitaciones respecto a la cantidad precipitada en cada pluviómetro (Figura 3.20.).

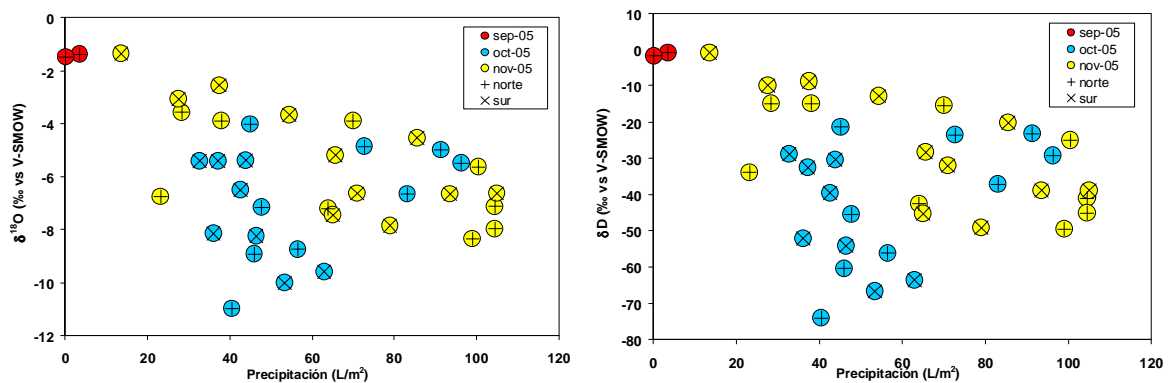


Figura 3.20. Relación de la composición isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ (izquierda) y del δD (derecha) en el agua de lluvia respecto a la cantidad precipitada en ambas vertientes entre los meses de septiembre y noviembre de 2005. Se observa que las muestras más pesadas corresponden al mes de septiembre donde las precipitaciones fueron menores. No se disponen de datos de cantidad precipitada en las muestras procedentes de los estudios previos y, por tanto, no han sido representados.

Aunque los datos son escasos para establecer tendencias, en ambas vertientes es apreciable un enriquecimiento en los isótopos pesados en las precipitaciones menos intensas, especialmente durante el mes de septiembre de 2005 (círculos rojos). Las muestras de agua de lluvia de dicho mes presentan los valores más pesados ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta\text{D} > -2\text{‰}$ vs V-SMOW) y se disponen a lo largo de una posible línea de evaporación (flecha negra en Figura 3.19.). Este fenómeno parece indicar un cierto proceso de evaporación durante la caída, al igual que se ha observado para otras islas del Archipiélago Canario como Gran Canaria (Gasparini et al., 1990), La Palma (Veeger, 1991) o Fuerteventura (Herrera, 2001). Un argumento a favor de dicha hipótesis se encuentra en que 12 de las 14 muestras de agua de lluvia con $d < +10\text{‰}$ pertenecen a la vertiente sur y a cotas inferiores a los 900 m.s.n.m., donde las temperaturas son relativamente más altas y donde las gotas de lluvia tienen un mayor recorrido de caída.

Después de descartadas las muestras que aparentan presentar un enriquecimiento por evaporación durante la caída (con $d < +10\text{‰}$ vs V-SMOW; en negrita en las Tablas 3.6. y 3.7), con los datos restantes se observó la variación espacial (por cota, vertiente y distancia a la costa) y temporal (en los tres meses de observación) de la composición isotópica del agua de lluvia en cada pluviómetro, representado en la Figura 3.21.

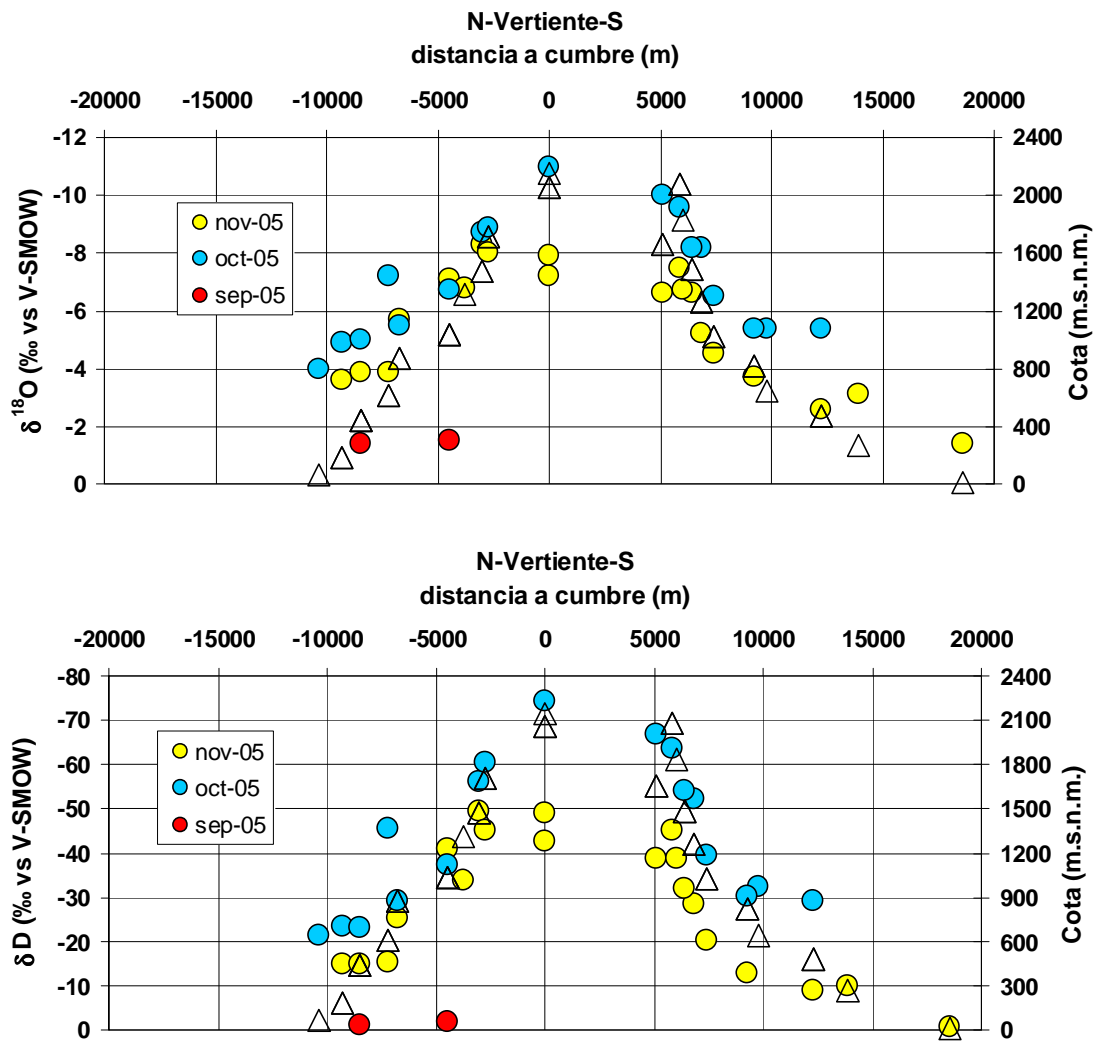


Figura 3.21. Variación espacial y temporal de la composición isotópica de δ¹⁸O y δD del agua de lluvia en cada pluviómetro instalado en la presente tesis. Los valores negativos del eje de abscisas indica la distancia a la cumbre de la vertiente norte y los triángulos indican la cota de cada pluviómetro (que coincide con la vertical en el eje superior del contenido isotópico).

Aunque los resultados están muy condicionados al escaso número de datos y al corto periodo de observación para caracterizar correctamente las variaciones, especialmente para el mes de septiembre en el que se sólo hay dos datos útiles, en la Figura 3.21. se puede observar que en general, para ambas vertientes, existe una buena correlación espacial entre la distancia a la cumbre, la altitud o cota y la composición isotópica de δ¹⁸O y δD en las aguas de lluvia durante el periodo de observación.

Con los datos isotópicos, que no parecen estar afectados por la evaporación durante la caída, el siguiente paso fue calcular el promedio ponderado de la composición isotópica del agua de lluvia en cada pluviómetro, según la siguiente ecuación propuesta por Yurtsever y Gat (1981):

$$\delta H_p = \frac{\sum^n i [P_i \cdot \delta_i]}{\sum^n i [P_i]} \quad [3.8.]$$

donde δH_p es la media ponderada, P_i es la precipitación mensual y δ_i es la composición isotópica de la alícuota de la precipitación del mes i . En la Tabla 3.8. se resumen los resultados obtenidos en cada pluviómetro.

Tabla 3.8. Promedio ponderado de la composición isotópica de δD y $\delta^{18}O$ (‰ vs V-SMOW) del agua de lluvia en cada pluviómetro. Del P9 al P1 pertenecen a la vertiente sur y del P5 al P21 a la norte.

Nº	P9*	P18	P17	P12	P10	P8	P22	P3	P4	P2	P7	P1
$\delta^{18}O$	-7,9	-8,5	-6,7	-7,8	-7,3	-6,2	-5,2	-4,4	-5,4	-3,9	-3,1	-1,4
δD	-49,2	-54,2	-38,9	-48,2	-40,8	-36,8	-26,7	-20,7	-32,5	-18,2	-9,9	-0,8
Nº	P5*	P11*	P6*	P13*	P15*	P14*	P19*	P20*	P16*	P21*		
$\delta^{18}O$	-4,0	-4,5	-4,6	-5,2	-5,6	-6,9	-6,8	-8,5	-8,3	-8,7		
δD	-21,4	-21,1	-20,2	-27,6	-27,2	-39,3	-33,9	-52,0	-49,8	-54,8		

* Pluviómetros ubicados en el acuífero de Las Cañadas o en sus proximidades (ver Figura 3.3.).

Tomando de la Tabla 3.8. sólo la composición isotópica promedio ponderada del agua de lluvia de los pluviómetros ubicados en el acuífero de Las Cañadas (Figura 3.3.) se obtiene un valor medio de $\delta^{18}O = -6,4$ y $\delta D = -36,0$ (‰ vs V-SMOW). Si se pondera descartando también los datos isotópicos de septiembre en los que no se espera recarga o ésta es relativamente pequeña dada las escasas precipitaciones y el déficit de humedad ambiente y en el suelo, se obtiene una composición isotópica sólo algo más ligera de $\delta^{18}O = -6,6$ y $\delta D = -37,0$ (‰ vs V-SMOW). Dado el escaso número de muestras (39, tras descartar 11 por posible evaporación) y el corto periodo de observación (3 meses) con el que se han estimado estos valores, es importante recordar que son poco representativos para poder caracterizar correctamente la composición isotópica del agua de lluvia del acuífero. Estos valores sólo sirven como una primera aproximación que debe ser comprobada y mejorada con un mayor número de muestras y de un periodo de observación más largo que el de la presente tesis, o incluyendo pequeños manantiales o nacientes al igual que hicieron Custodio et al. (1987).

Con todos los datos de la composición isotópica promedio ponderada del agua de lluvia (Tabla 3.8.), junto a los datos de los estudios previos que no fueron descartados por posible evaporación, se dedujo una nueva línea meteórica local (LML) por interpolación por mínimos cuadrados: $\delta D = 7,7 \cdot \delta^{18}O + 13,4$ ($n=61$; $r^2 = 0,95$) (línea negra en la Figura 3.22.). Esta nueva línea meteórica local (LML) tiene una pendiente muy próxima a 8, que corresponde con la de la línea meteórica mundial (LMM). Si se ajustan los valores de δD y $\delta^{18}O$ a dicha pendiente se obtiene un d igual a $+15,5$ ‰ vs V-SMOW (línea naranja en la Figura 3.22.), muy similar al $d = +15$ ‰ obtenido para Tenerife por Custodio et al (1987) con los datos que han sido incluidos en la presente tesis (ver Tabla 3.8.).

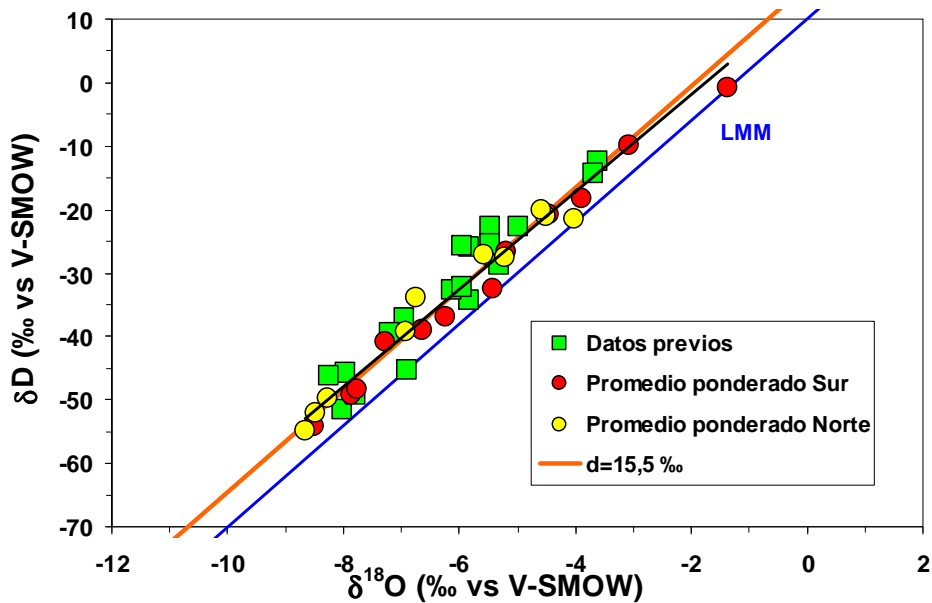


Figura 3.22. Relación de la composición isotópica promedio ponderada de δD y $\delta^{18}O$ en las aguas de lluvia analizada en la presente tesis así como de la composición isotópica de las precipitaciones (lluvia y nieve) de estudios previos cuyo exceso de deuterio fuera igual o superior a +10 (‰ vs V-SMOW). Línea negra: nueva línea meteórica local (LML): $\delta D = 7,7 \cdot \delta^{18}O + 13,4$; línea azul: línea meteórica mundial (LMM): $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961).

■ Gradiente altitudinal (δ -altitud)

Se conoce como gradiente altitudinal (δ -altitud) al empobrecimiento isotópico del agua de lluvia con el aumento de la altitud. Este fenómeno se debe principalmente al proceso adiabático de condensación Rayleigh del vapor atmosférico y se basa en la condensación y precipitación preferencial de las moléculas isotópicamente más pesadas del mismo (Gonfiantini et al., 2001). Como la relación $^2H/^1H$ y $^{18}O/^{16}O$ es ligeramente mayor en el agua líquida y la nieve precipitada que en la fase vapor residual, cuando las masas de aire ascienden por las laderas de las altas montañas y se enfrían como consecuencia de la expansión adiabática, dicho vapor residual va quedando progresivamente empobrecido en isótopos pesados (Gonfiantini et al., 2001). En general, el gradiente altitudinal suele ser menor en las islas volcánicas con un abrupto relieve que en las zonas continentales debido a la rápida elevación de las nubes asociadas a las precipitaciones por las laderas de las islas (Custodio, 1986). Aún así, el δ -altitud es muy útil para determinar la cota de recarga y las posibles líneas de flujo del agua subterránea (Gonfiantini, 1973; Veeger, 1991; Scholl et al., 1996; Hildenbrand et al. 2005; Demlie et al., 2007; Asai et al., 2009).

En las dos gráficas de la Figura 3.23. se representa la cota de muestreo frente a la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD de una selección de las precipitaciones en los estudios previos y de los datos ponderados de la composición isotópica en el agua de lluvia analizada en cada uno de los pluviómetros en la presente tesis (ver Tabla 3.8.):

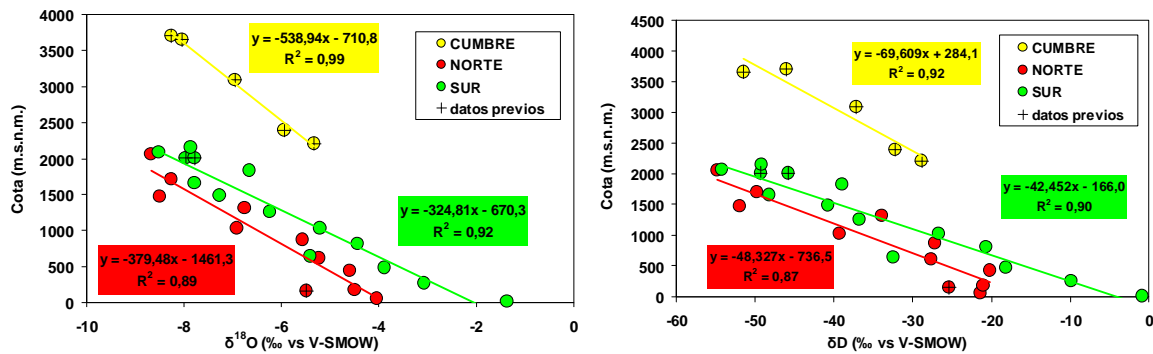


Figura 3.23. Gradientes altitudinales (δ -altitud) obtenidos a partir de los datos de estudios previos (con símbolo "+") y de la composición isotópica promedio ponderada del agua de lluvia de la Tabla 3.8. para la vertiente sur (verde) y la vertiente norte (rojo), así como para la zona de cumbre (amarillo).

Para calcular los gradientes altitudinales sólo se ha utilizado una selección de los datos de estudios previos (marcados con un asterisco en el norte en la Tabla 3.7.). Se han descartado las precipitaciones de los grupos noreste (NE) y sureste (SE) de Tenerife (ver Tabla 3.7. y Figura 3.18.) ya que pertenecen a otras regiones de la isla muy alejadas de la zona de estudio. Tampoco se han usado otros 8 datos de estudios previos que, si bien pertenecen a algunas de las zonas de estudio, su cota topográfica y/o su localización geográfica no parecen coincidir con la composición isotópica que tienen, indicando posiblemente algún error en la localización de las muestras o un efecto estacional derivado de un muestreo puntual o temporalmente insuficiente.

Aunque el periodo de observación en la presente tesis es limitado para caracterizar correctamente la variación isotópica del agua de lluvia de las diferentes zonas de Tenerife, en las dos gráficas de la Figura 3.23. se pueden diferenciar varios gradientes altitudinales. Para la vertiente norte los gradientes representan un aligeramiento isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de $-0,23$ y de $-1,8\text{‰}/100\text{m}$ vs V-SMOW) cada incremento de 100 m de altitud, respectivamente, mientras que en la vertiente sur los mismos gradientes son de $-0,28$ y de $-2,1\text{‰}/100$ vs V-SMOW) cada incremento de 100 m de altitud, respectivamente.

En la Figura 3.23. también se puede observar claramente que las muestras de precipitación en forma de lluvia y nieve pertenecientes a la zona de cumbre responden a un gradiente altitudinal diferente al de ambas vertientes, con una pendiente algo menor ($\delta^{18}\text{O} = -0,18 \text{‰}/100 \text{ m}$ y $\delta\text{D} = -1,3 \text{‰}/100 \text{ m}$). Este resultado parece indicar, aunque de una manera preliminar debido a la escasez de datos, que en Tenerife, al igual que se ha observado en otras islas volcánicas de gran altitud como Hawai (Scholl et al., 1996) o en el volcán Etna (D'Alessandro et al., 2004), existe un gradiente altitudinal diferente para las cotas más elevadas o zona de cumbres.

■ Discusión

Para la caracterización isotópica de δD y $\delta^{18}\text{O}$ de las precipitaciones en las vertientes norte y sur de Tenerife, además de los datos bibliográficos recopilados de diferentes fuentes,

sólo se dispuso de los resultados de las muestras recolectadas desde septiembre a noviembre de 2005 en los 22 pluviómetros instalados. En estos meses de muestreo se apreció un "efecto de cantidad de lluvia" (Gonfiantini et. al, 2001) especialmente en el mes de septiembre que fue el más seco y de mayor temperatura de los tres, que generaron precipitaciones excesivamente enriquecidas en isótopos pesados, posiblemente debido a la evaporación durante la caída de la gota de agua, que dan un exceso de deuterio (d) inferior a +10 ‰. Para la correcta interpretación de los resultados dichas muestras han sido descartadas.

La variación espacial y temporal de la composición isotópica del agua de lluvia analizada en la presente tesis sigue unos patrones normales, experimentando un empobrecimiento con el aumento de altitud y de la distancia a la costa en ambas vertientes en los tres meses de los que se disponen datos. No obstante, es importante destacar que en el mes de noviembre el promedio ponderado de la composición isotópica del agua de lluvia en todos los pluviómetros fue más pesado que en el mes de octubre, y que el agua de lluvia de la vertiente norte de la isla tiene una composición isotópica promedio ponderada relativamente más ligera que el agua de lluvia de la vertiente sur. Estos resultados son contrarios de lo que cabría esperar a tenor de la menor temperatura ambiente en noviembre (Gonfiantini et al., 2001) y de las características del régimen pluviométrico en cada vertiente (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

Partiendo del hecho que la formación de las nubes genera una marca isotópica diferente, según su origen y época del año, debido a los diferentes ambientes de humedad y temperatura en los que se forman, y que a su vez las lluvias que éstas producen presentan variaciones isotópicas latitudinales y altitudinales, puede ser posible interpretar las variaciones estacionales en la composición isotópica de las precipitaciones a partir de la caracterización de las inestabilidades atmosféricas que las generan (Davis et al., 1970; Liu, 1984; Nicolini et al., 1989; Ellins, 1992; Scholl et al., 1996). Por ejemplo, en otras islas volcánicas de gran relieve similares a Tenerife, como Hawaii, se ha observado que las lluvias derivadas de los vientos alisios son isotópicamente más pesadas porque representan el producto de la primera condensación de la humedad derivada del océano al ascender éstos por la isla debido a la orografía, y porque se sitúan por debajo de la inversión térmica donde la temperatura mínima es relativamente alta (aproximadamente de 11°C). Sin embargo, cuando las tormentas oceánicas afectan a la isla ya han descargado parte del agua isotópicamente más pesada, dejando por tanto precipitaciones relativamente más ligeras (Scholl et al., 1995, 1996). Además, estas tormentas pueden alcanzar la condensación a más de 4000 m.s.n.m. y, por tanto, a menor temperatura, lo que puede generar un importante fraccionamiento en el vapor de agua, favoreciendo la formación de lluvias isotópicamente más ligeras que las derivadas de los alisios.

Por tanto, una posible explicación de los resultados tal vez podría obtenerse del estudio en detalle del origen y cuantificación de las precipitaciones en uno y otro mes. En Tenerife, al igual que sucede en Hawaii, la vertiente sur o de sotavento prácticamente sólo recibe precipitaciones durante los meses de invierno y procedentes de fenómenos tormentosos

que dejan lluvias intensas pero cuantitativamente menores que en la vertiente norte, donde no sólo se producen precipitaciones relacionadas con las tormentas sino también con el aporte de humedad constante de los vientos alisios (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

Durante los meses de octubre y noviembre de 2005 no se siguió el patrón normal del régimen pluviométrico en ninguna de las dos vertientes. Las precipitaciones en la vertiente sur fueron durante octubre y noviembre un 45 y un 50% superiores al promedio calculado con las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), respectivamente (Tabla 3.9.). En la vertiente norte el mes de octubre también fue un 27% superior que la media de esa vertiente para dicho mes; sin embargo el mes de noviembre fue mucho más seco con precipitaciones un 41% menor. Tal vez el "efecto de cantidad de lluvia" en noviembre en la vertiente sur y la escasez de las mismas en el norte, sean parte de los responsables de las diferencias observadas en una y otra vertiente.

Tabla 3.9. Precipitación media mensual registrada en las vertientes norte y sur de Tenerife en la presente tesis durante los meses de octubre y noviembre de 2005, en comparación con la precipitación media mensual calculada a partir de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (ver Tabla 3.1.).

	Norte octubre	Sur octubre	Todo octubre	Norte noviembre	Sur noviembre	Todo noviembre
Precipitación media (mm/mes)	64,4	42,9	52,1	63,7	64,8	64,3
Precipitación media AEMET (mm/mes)	50,7	28,5	38,3	107,8	44,5	73,7
Desviación de la precipitación media respecto a la media de la AEMET (%)	27	29	38	-41	45	-12

A partir del promedio ponderado de la composición isotópica del agua de lluvia analizada en la presente tesis y de los datos de estudios previos se dedujo una nueva línea meteórica local para Tenerife (LMLTF) de $\delta D = 7,7 \cdot \delta^{18}O + 13,4$. Dicha línea meteórica local tiene una pendiente muy parecida a la de la LMM (que es de 8) y dado que el error de las medidas está entre 0,5 ‰ y 0,05 ‰, para el $\delta^{18}O$ y δD respectivamente, a efectos prácticos si se ajustan los valores de δD y $\delta^{18}O$ a dicha pendiente, se obtiene un exceso de deuterio medio de $d = +15,5$ ‰. Este valor es muy similar al obtenido por Custodio et al. (1987) para Tenerife ($d = +15$ ‰), con un menor número de datos, aunque es relativamente mayor que el calculado por Gasparini et al. (1990) para las precipitaciones de la vecina isla de Gran Canaria ($d = +13,5$ ‰). El exceso de deuterio que se ha observado en estas islas del Archipiélago Canario podría ser causado por un ambiente atmosférico marino más seco, tal vez relacionado con la cercanía al continente africano (Jiménez-Martínez y Custodio, 2008).

La pendiente de la nueva LMLTF es relativamente similar a las de las islas de Gran Canaria y Fuerteventura pero totalmente diferente a las obtenidas para la isla de La Palma por Veeger (1991) y Pérez et al. (1995), las cuales son similares entre sí y con pendientes mucho menores que el resto (ver Tabla 3.10.). Según Veeger (1991) esta diferencia se debe a una combinación de dos procesos: por un lado, a que no se ha tenido en cuenta la posible evaporación durante la caída de la gota de agua y, por otro, al propio fraccionamiento isotópico debido a la pérdida de masa durante el ascenso orográfico de los vientos alisios.

Tabla 3.10. Líneas meteóricas locales (LML) obtenidas en las islas del Archipiélago Canario por diferentes autores, en comparación con la línea meteórica mundial (LMM). N°: número de puntos de muestreo con los que se obtuvo la LML; Tipo: As: aguas subterráneas de recarga, P: precipitación, M: manantiales. Valores en ‰ V-SMOW.

Localización	N°	Tipo	LML	Fuente
Tenerife, España	41	P	$\delta D = 7,7\delta^{18}O + 13,4$	Este trabajo
Tenerife, España	10	P y M	$\delta D = 8\delta^{18}O + 15$	Custodio et al., 1987
Tenerife, España	10	P y M	$\delta D = 8\delta^{18}O + 17$	Gonfiantini, 1973
Fuerteventura, España	8	P	$\delta D = 8,6\delta^{18}O + 15$	Herrera, 2001
Gran Canaria N, España	-	As	$\delta D = 7,3\delta^{18}O + 13$	Gonfiantini, 1974
Gran Canaria S, España	-	As	$\delta D = 4,2\delta^{18}O + 2,6$	Gonfiantini, 1974
Gran Canaria, España	-	As	$\delta D = 8,4\delta^{18}O + 19,4$	Gonfiantini, 1974
Gran Canaria, España	11	P	$\delta D = 8,1\delta^{18}O + 13,5$	Gasparini et al., 1990
La Palma, España	5	As	$\delta D = 5,9\delta^{18}O + 5,4$	Veeger, 1991
La Palma, España	-	P	$\delta D = 5,6\delta^{18}O + 4,2$	Pérez et al., 1995
LMM			$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$	Craig, 1961

A partir de la cota y del promedio ponderado de la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD del agua de lluvia en cada pluviómetro y de una selección de los datos de estudios previos, se calcularon los gradientes altitudinales para ambos isótopos. Como se puede observar en la Tabla 3.11., los gradientes altitudinales obtenidos para ambas vertientes son similares entre sí y, a su vez, a los publicados por Gonfiantini (1973) y Custodio et al. (1987) también para la isla de Tenerife, y de aquellos publicados para otras islas del Archipiélago Canario y del resto del mundo.

Tabla 3.11. Gradientes altitudinales del $\delta^{18}O$ y δD obtenidos en el Archipiélago Canario y en otras islas volcánicas y no volcánicas alrededor del mundo. N°: número de puntos de muestreo. Tipo: As: aguas subterráneas de recarga; L: lluvia; M: manantiales; N: nieve; R: arroyos o riachuelos. V (Vertiente): N: norte; S: sur; C: cumbre. Ver más explicación en el texto.

Localización	N°	Tipo	V	Grad. Altitud ($\delta^{18}O\text{‰}/100\text{m}$)	Grad. Altitud ($\delta D\text{‰}/100\text{m}$)	Fuente
Tenerife	11	L	N	-0,23	-1,8	Este trabajo
Tenerife	14	L	S	-0,28	-2,1	Este trabajo
Tenerife	5	N	C	-0,18	-1,3	Este trabajo
Tenerife	5	L	NyS	-0,22	-1,9	Gonfiantini, 1973
Tenerife	10	L y M		-0,24		Custodio et al., 1987
La Gomera	-	-		-0,24		Custodio y Manzano, 2000
Gran Canaria	-	As	N	-0,13	-1,0	Gonfiantini et al., 1976
Gran Canaria	-	As	S	-0,25	-1,2	Gonfiantini et al., 1976
Gran Canaria	4	L	N	-0,13		Gasparini et al., 1990
Gran Canaria	5	L	S	-0,25		Gasparini et al., 1990
Fuerteventura	4	L		-0,27 a -0,32		Herrera, 2001
La Palma	6	As		-0,24	-1,27	Veeger, 1991
Isla Negros, Filipinas	4	L		-0,19	-1,14	Gerardo et al., 1973
Tatun Shan, Taiwán	32	M y A		-0,15		Liu, 1984
La Reunión, Francia	-	-		-0,12		Grünberger, 1989

Localización	Nº	Tipo	V	Grad. Altitud ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}/100\text{m}$)	Grad. Altitud ($\delta\text{D}\text{‰}/100\text{m}$)	Fuente
Martha Brae, Jamaica	3	L		-0,9	-2,2	Ellins, 1992
Campo geotermal en Filipinas	3	L		-0,07	-0,25	Alvis-Isidro et al., 1993
Mt. Yatsugatake, Japón	10	L			-1,69	Yasuhara et al., 1995
Volcán Kilauea, EE.UU.	50	L y M		-0,15 a -0,32	-0,98 a -2,6	Scholl et al., 1996
Volcán Etna, Italia	14	L		-0,06 a -0,27		D´Alessandro et al., 2004
Tahiti-Nui	6	L		-0,07		Hildenbrand et al., 2005
Stromboli, Italia	6	L		-0,22	-0,99	Liotta et al., 2006
Media Mundial				-0,28		Poage y Chamberlain., 2001

La diferencia entre los gradientes altitudinales para el $\delta^{18}\text{O}$ de cada vertiente de Tenerife es menor de la esperada teniendo en cuenta lo observado por Gonfiantini et al (1976) en las aguas subterráneas de recarga y por Gasparini et al. (1990) en las precipitaciones, ambos en Gran Canaria (Tabla 3.11.). En esos trabajos se observó que el δ -altitud para el $\delta^{18}\text{O}$ en la vertiente norte (-0,13 ‰/100 m) es de mucha menor pendiente que en la vertiente sur (-0,25 ‰/100 m). En Tenerife los gradientes en la vertiente norte también son menores que en la vertiente sur, pero la diferencia es menos acusada. Gasparini et al. (1990) interpretaron que la variación isotópica de la precipitación durante el ascenso de las nubes en la vertiente sur o de sotavento es más intensa que en la norte o de barlovento porque el reservorio de vapor condensable también es más limitado en la primera, dada la mayor temperatura en dicha vertiente. Teniendo en cuenta que el número de pares isotópicos disponibles en la presente tesis se limita sólo a 3 de los 17 meses de observación, es probable que en el caso de haber diferencias más acusadas entre ambas vertientes en la isla de Tenerife, no haya un número suficiente para poder identificarlas.

Las muestras de lluvia tomadas a altitudes superiores a los 2400 m.s.n.m. y de nieve, que se han agrupado como zona de "cumbre", conforman un gradiente altitudinal claramente diferente y con una pendiente menor que en las vertientes norte y sur de la isla (Tabla 3.11.). Posiblemente este gradiente altitudinal anómalo de la zona de cumbres está relacionado con el cambio en las condiciones climáticas a estas cotas. Mientras en Hawai y en la mayor parte del mundo el gradiente en la zona de cumbres es mayor que en cotas menos elevadas debido a la condensación de la nieve a partir de la masa de aire ascendente (Scholl et al., 1996), en el Etna al igual que en el Teide, las pendientes son menores. Según D´Alessandro et al. (2004) las tres causas posibles de este gradiente anómalo respecto a la tendencia normal a nivel mundial son: la mezcla de vapor de agua de diferentes orígenes, un muestreo defectuoso de la nieve o el efecto de los gases volcánicos que poseen una composición isotópica más pesada. En el caso de las nieves del Teide las dos primeras causas parecen las más probables; sólo un muestreo más exhaustivo de las precipitaciones en forma de nieve tal vez permitiría descartar la interacción con los gases volcánicos que se emiten de manera difusa a través del suelo del edificio volcánico (i.e. Galindo, 2005; Hernández et al., 2006).

Es importante destacar que la validez de los gradientes altitudinales obtenidos en la presente tesis para la isla de Tenerife se limita, a falta de analizar la serie de datos completa hasta febrero de 2007, a los tres meses de los que se disponen muestras (septiembre, octubre y noviembre de 2005) no pudiendo extrapolarse como datos característicos de la isla. Al igual que existe una variación estacional de la composición isotópica del agua de lluvia, el gradiente altitudinal obtenido a partir de dicha composición también cambia a lo largo del año e incluso de tendencia (Scholl et al., 1996; Gonfiantini et al., 2001). Esta importante limitación, ya fue tomada en cuenta por Custodio et al. (1987) que obtuvieron el gradiente altitudinal de Tenerife sólo con los datos procedentes de manantiales, ya que tampoco disponía de una serie larga de medidas de la lluvia. Los manantiales seleccionados por dichos autores tienen un contenido de tritio (^3H) relativamente elevado ($>1,5$ UT), de lo cual se deduce que proceden de precipitaciones recientes y representan sistemas de drenaje de pequeña extensión superficial y altitud (Custodio et al., 1987). El contenido isotópico de δD y $\delta^{18}\text{O}$ en los manantiales es más representativo porque posiblemente es un promedio ponderado de las precipitaciones caídas durante un periodo de tiempo más largo.

Por tanto, dada la mayor representatividad del gradiente altitudinal obtenido por Custodio et al. (1987) para la isla de Tenerife, en la capítulo 4 de la presente tesis se ha optado por utilizar dicho gradiente para calcular la cota de recarga de las aguas subterráneas del acuífero de Las Cañadas y de las zonas adyacentes.