

OTRAS PUBLICACIONES DEL AUTOR

- «Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias»
- «Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos»
- «Ingeniería forestal y ambiental en medios insulares»
- «Climate change and restoration of degraded lands»
- «Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos»
- «Investigación Gestora y Técnica Forestal en la Región de la Macaronesia»
- «Restauración de la Gubierna Vegetal y de Espacios Degradados en la Región de la Macaronesia»
- «Ensayos geotécnicos de suelos y rocas»
- «Environmental security, geological hazards and management»
- «Laboratorio virtual de mecánica de suelos y rocas»
- «Minería del agua y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos»

La presente obra aporta un compendio de conceptos, metodologías y técnicas necesarias para poder acometer un proyecto minero para la explotación de las aguas subterráneas en las islas volcánicas oceánicas. El texto presenta dos partes diferenciadas. Por un lado, se introduce en la ciencia y el conocimiento básico necesario para entender el funcionamiento de los acuíferos en las islas volcánicas, es decir, la hidrología e hidrogeología de las islas oceánicas. Continúa con la técnica y estrategias de extracción del agua subterránea y, se complementa, con un anexo donde se indican las partes fundamentales que deben comprender un proyecto minero de estas características.

El autor de la obra, Juan Carlos Santamarta Cerezal, es Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en Ingeniería Hidráulica y Energética (ETSIICC), Ingeniero de Montes (UPM), Civil (ULPGC) e Ingeniero Técnico de Minas (UPM). Investigador afiliado al Water Resources Research Center (WRRRC) de la Universidad de Hawái en EE.UU. (2013-2015), e Investigador colaborador del IUACA (Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales) de la Universidad de Alicante. El libro ha contado con la colaboración de dos grandes profesionales y expertos del mundo del agua de Canarias: el Ingeniero de Minas, Rafael Lario Bascones y el Doctor en Geología Rayco Marrero. El prólogo ha sido escrito por el Catedrático de la Escuela de Ingenieros de Minas de Vigo, el Doctor Enrique Orche.

Esta es una obra de gran interés para académicos, ingenieros, consultores y profesionales implicados en proyectos de abastecimiento de islas volcánicas oceánicas, o estudiantes de Ingeniería, o Ciencias Geológicas, que quieran iniciarse en las técnicas mineras para la búsqueda y explotación de aguas en terrenos volcánicos, así como su hidrogeología.



ULL
Universidad
de La Laguna



Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



Juan Carlos Santamarta Cerezal

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en Ingeniería Hidráulica y Energética (ETSIICC), Ingeniero de Montes, Civil e Ingeniero Técnico de Minas por la UPM, Investigador afiliado al Water Resources Research Center (WRRRC) de la Universidad de Hawái en EE.UU. (2013-2015) e Investigador colaborador del IUACA (Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales) de la Universidad de Alicante. Ha publicado en la Universidad 170 artículos, ha dirigido y docencia, incluyendo 12 libros técnicos, al conocimiento del agua y el medio ambiente de las islas volcánicas oceánicas, principalmente en la región de la Macaronesia. Su actividad investigadora se complementa con su gran perfil docente, donde destacan sus premios y reconocimientos a la innovación docente en las enseñanzas universitarias de grado en 2013, 2014 y 2015, así como en la dirección y organización de 56 cursos y seminarios en relación a los recursos hídricos y naturales. Director de 4 tesis doctorales. Profesor colaborador de cursos de postgrado y Máster en universidades Nacionales (Barcelona, Nabija, UNED, UCM, UPM, Sevilla) e internacionales como la Universidad de Azores, en Portugal y la Universidad de Funchal, en EE.UU.

Su pasión, además de su familia, es el agua y los bosques. Gracias a este interés ha podido viajar por medio mundo, observando los diferentes sistemas de aprovechamiento y gestión del agua, principalmente en sistemas rurales y su relación con el medio ambiente. Siempre que puede se acerca a la ciudad que le vio crecer, León.

Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



ULL | Universidad
de La Laguna

TRATADO DE MINERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS

©Juan Carlos Santamarta Cerezal | jcsanta@ull.es

EDITA:



Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España
Avda. República Argentina, 26 - 5ºE. 41011 SEVILLA
surminas@surminas.org

Con la colaboración del Vicerrectorado de Relaciones con la Sociedad.



Universidad
de La Laguna



Diseño y Maquetación: Mónica Ortiz Melchor ☎616 609 472

Depósito Legal: TF 274-2016

ISBN: 978-84-608-7621-2

208 pp. ; 24 cm

1ª Edición: Noviembre, 2016.

Como citar este libro:

SANTAMARTA J.C. (2016). *Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas*.

Sevilla: Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso del autor.

A mis hijos: Enrique y Guillermo.

*«Espero que un día os sintáis tan orgullosos de vuestros padres, como
me siento de los míos, vuestros abuelos, Lucila y Fausto.»*



ÍNDICE

PRÓLOGO	11
PRÓLOGO DEL AUTOR	13
PARTE I. VULCANISMO Y RECURSOS HÍDRICOS	17
CAPÍTULO 1. VULCANISMO Y FORMACIÓN DE ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	19
1.1 ISLAS	19
1.2 TEORÍAS DE FORMACIÓN DE LAS ISLAS OCEÁNICAS	20
1.3 TIPOS DE VULCANISMO	25
1.4 ETAPAS DE FORMACIÓN DE UNA ISLA	29
1.5 MATERIALES VOLCÁNICOS	33
1.5.1 <i>Introducción</i>	33
1.5.2 <i>Rocas volcánicas</i>	34
1.5.3 <i>Lavas</i>	36
1.5.4 <i>Piroclastos</i>	39
1.5.5 <i>Depósitos piroclásticos</i>	40
1.5.6 <i>Diques</i>	43
CAPÍTULO 2. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	45
2.1 LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	45
2.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	47
2.2.1 <i>Estudio del ciclo del agua</i>	49
2.2.2 <i>Precipitación</i>	49
2.2.3 <i>Escorrentía</i>	52
2.2.4 <i>Infiltración</i>	55
2.2.5 <i>Evapotranspiración</i>	58
2.2.6 <i>Precipitación horizontal, oculta o de niebla</i>	60
2.2.7 <i>Aguas superficiales</i>	63
2.2.8 <i>El régimen torrencial</i>	64

2.2.9	<i>Erosión hídrica</i>	67
2.2.10	<i>Aguas costeras</i>	70
2.2.11	<i>Recarga del acuífero</i>	71
CAPÍTULO 3. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS		73
3.1	INTRODUCCIÓN	73
3.2	MARCO HIDROGEOLÓGICO	74
3.3	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES Y ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS	77
3.3.1	<i>Porosidad y permeabilidad inicial</i>	78
3.3.2	<i>Composición mineralógica de las rocas</i>	78
3.3.3	<i>Alteración hidrotermal y compactación</i>	78
3.3.4	<i>Fracturación secundaria</i>	80
3.3.5	<i>Flujos de lava o coladas</i>	80
3.3.6	<i>Depósitos piroclásticos</i>	81
3.3.7	<i>Diques geológicos</i>	82
3.3.8	<i>El agua en el suelo</i>	83
3.3.9	<i>Paleosuelos</i>	84
3.4	TIPOS DE ACUÍFEROS INSULARES	85
3.4.1	<i>Ambiente volcanoestructural</i>	85
	A. Macizos basálticos	85
	B. Zonas dorsales o rift	86
	C. Valles y depresiones	86
3.4.2	<i>Acuíferos formados por deslizamientos gravitacionales</i>	86
3.4.3	<i>Acuífero basal o general</i>	87
3.4.4	<i>Acuíferos colgados</i>	88
3.4.5	<i>Acuíferos costeros</i>	89
3.5	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA HIDROQUÍMICA DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS	89
3.5.1	<i>Contenido catiónico</i>	90
3.5.2	<i>Contenido aniónico</i>	90
3.5.3	<i>Aporte endógeno y agresividad del agua</i>	91
3.5.4	<i>Problemas de calidad en el recurso</i>	91
	3.5.4.1 <i>Salinización</i>	92
	3.5.4.2 <i>Flúor</i>	94
PARTE II. INGENIERÍA MINERA		97
CAPÍTULO 4. TIPOLOGÍA DE LOS APROVECHAMIENTOS; MINERÍA DEL AGUA		99
4.1	INTRODUCCIÓN	99
4.2	MINAS DE AGUA	100
4.3	GALERÍAS DE AGUA	100
4.3.1	<i>Galerías convencionales horizontales o dike tunnel</i>	100
4.3.2	<i>Galerías de nacientes</i>	102
4.3.3	<i>Galerías en trancada o inclined shaft</i>	102
4.3.4	<i>Pozo galería</i>	103
4.4	OTROS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN TERRENOS VOLCÁNICOS	103

4.4.1	Pozo tradicional canario	103
4.4.2	Sondeos	105
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA GALERÍA-MINA DE EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS		109
5.1	INTRODUCCIÓN	109
5.2	PROBLEMAS GEOTÉCNICOS USUALES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS EN TERRENOS VOLCÁNICOS	113
5.2.1	Introducción	113
5.2.2	Soluciones técnicas	114
5.2.3	Clasificación geotécnica de los materiales volcánicos encontrados en la traza de la mina	120
	A. Tipos de materiales	121
5.3	INNOVACIONES CONSTRUCTIVAS: REGULACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE LA RECONSTRUCCIÓN DE DIQUES GEOLÓGICOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE SONDEOS DIRIGIDOS	123
5.3.1	Regulación de caudales mediante la reconstrucción de diques geológicos	123
	A. Planteamiento del problema	125
	B. Construcción	126
CAPÍTULO 6. EXPLOSIVOS		129
6.1	LOS EXPLOSIVOS	129
6.2	LA PERFORACIÓN POR EXPLOSIVOS	129
6.3	ESQUEMA DE TRABAJO	131
CAPÍTULO 7. SEGURIDAD EN LAS EXPLOTACIONES		133
7.1	SEGURIDAD	133
7.2	ACCESO	133
7.3	REGLAMENTO DE SEGURIDAD	133
7.4	SINGULARIDADES EN CUANTO A SEGURIDAD	136
7.4.1	Coyunturales	136
7.4.2	Técnicas	137
	A. Excavación - Construcción	137
	B. Atmósfera y ventilación	139
	C. Electrificación	141
	D. Acceso	144
7.5	ALGUNAS CONCLUSIONES	147
ANEXO A. CONTENIDOS Y CÁLCULOS TIPO DE UNA MINA/GALERÍA DE AGUA EN TERRENO VOLCÁNICO		151
A.1	INTRODUCCIÓN	153
A.1.1	Proyectos de minas y galerías de agua	153
A.1.2	Pequeños aprovechamientos de aguas subterráneas destinados al autoconsumo	155
A.1.3	Obras para el mantenimiento de caudal inscrito en el Registro de Aguas	155
A.2	LA MEMORIA DEL PROYECTO DE GALERÍA DE AGUA	158

A.2.1	<i>Situación y accesos</i>	159
A.2.2	<i>Geología e Hidrogeología</i>	161
A.2.3	<i>Geotecnia</i>	162
A.2.4	<i>Descripción de las obras</i>	164
A.2.5	<i>Legislación aplicable</i>	164
A.2.6	<i>Plazo de ejecución</i>	165
A.2.7	<i>Plan de obra</i>	165
A.2.8	<i>Presupuesto</i>	166
A.3	PLANOS	166
A.4	EL PLIEGO DE CONDICIONES	166
A.5	LOS PRESUPUESTOS	167
A.6	LOS ANEXOS DEL PROYECTO	169
A.6.1	<i>La organización de las obras</i>	169
A.6.2	<i>El estado de alineaciones</i>	172
A.6.3	<i>Volumen de excavación, carga y transporte</i>	173
A.6.4	<i>Cálculos de perforación y explosivos</i>	174
A.6.5	<i>Control de las vibraciones</i>	180
A.6.6	<i>La ventilación</i>	181
A.6.7	<i>Instalaciones neumáticas</i>	184
A.6.8	<i>Instalaciones</i>	185
A.6.9	<i>Documento de seguridad y salud</i>	186
A.6.10	<i>Aspectos ambientales</i>	188
	BIBLIOGRAFÍA y TRABAJOS CITADOS	193
	LISTA de TABLAS Y FIGURAS	202

PRÓLOGO

11

El agua es un bien escaso en las Islas Canarias que, por ello, es necesario gestionar con la máxima prudencia y acierto. Y esta gestión comienza por la evaluación de los potenciales recursos hídricos y su reposición natural, por la investigación de los acuíferos y mantos en ellos contenidos, y sigue por su posterior extracción, almacenamiento, uso y consumo sostenibles aprovechando hasta la última gota de tan valioso y fundamental recurso.

Las rocas que forman las islas, de naturaleza volcánica, condicionan el comportamiento del agua en lo que respecta a su escorrentía superficial, infiltración, almacenamiento subterráneo y tipología de las captaciones y conducciones, hasta el punto de que puede hablarse de una cultura canaria del agua, muy arraigada entre la población, que ha dado lugar a un patrimonio hidráulico aún no bien conocido y valorado.

La variada morfología de las islas también tiene una influencia decisiva en la cantidad de agua de lluvia que reciben. Cuanto mayor es su relieve y altitud mejores son las condiciones para la descarga pluvial, bien sea de forma directa o como lluvia horizontal.

En cualquier caso, las Islas Canarias disponen de recursos de agua, fundamentalmente subterráneos, que se almacenan especialmente en las múltiples grietas, poros y huecos que presentan los materiales volcánicos. Debido a las extracciones efectuadas en las últimas décadas, estos recursos profundos se encuentran cada vez más lejos de la superficie; por ello, conocer su ubicación exacta y el volumen de agua retenido en las fisuras no es fácil, ni tampoco lo es extraerlo de forma sostenible. Por ello, el conocimiento de las rocas profundas, la prospección hidrogeológica y la captación del recurso deben acometerse con metodologías modernas que optimicen el binomio gasto/resultado. Es bien sabido por los técnicos implicados en Hidrogeología e Hidrología que las técnicas más adecuadas son las utilizadas en la búsqueda y explotación de yacimientos minerales, en su más amplio sentido, convenientemente adaptadas al recurso agua.

Y ahí es donde encontramos al autor de este libro, Juan Carlos Santamarta. En primer lugar hay que destacar que su formación a este respecto es envidiable, pues ha cursado estudios que abordan la problemática del agua desde distintos y complementarios puntos de vista (ingeniería de montes, civil y minas). Este conocimiento pluridisciplinar, unido al hecho de ser residente en las Islas Canarias y a la fluida y frecuente relación con instituciones nacionales y extranjeras con amplia experiencia en el estudio de acuíferos fisurados vinculados a ambientes isleños, le ha permitido adquirir una gran experiencia, a pesar de su juventud, en la investigación y captación de los recursos hídricos en islas volcánicas. El fruto de esta labor profesional ha quedado plasmado en más de una decena de libros escritos, solo o en colaboración, que repasan la problemática del agua en los medios insulares, cuya lectura es imprescindible para el buen conocimiento de la misma.

12

En esta ocasión el autor se ha decantado por la redacción de un libro de contenido novedoso que incorpora los aspectos mineros a los proyectos de explotación de las aguas subterráneas en los acuíferos volcánicos isleños. Para ello ha dividido el texto en dos partes claramente diferenciadas: la primera, más tradicional, permite entender cómo son los acuíferos volcánicos insulares y cómo funciona el agua contenida en ellos; la segunda explica las técnicas mineras al uso en la extracción de aguas subterráneas, pues técnica minera es la construcción de galerías subterráneas y lo que ello lleva aparejado. El autor incide específicamente en los contenidos que deben contemplarse en cualquier proyecto de captación, que deben tener una importante componente minera debido al uso continuado de técnicas constructivas así conceptuadas por la legislación vigente; de esta forma se abordan aspectos tan poco tratados en los textos hidrológicos como la excavación de galerías subterráneas, el uso de explosivos, las voladuras y el tratamiento de la seguridad, especialmente en lo que respecta a la ventilación, la electrificación y los accesos.

Una cuidada y abundante bibliografía completa el texto. El hecho de que el libro sea editado por el Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España, avala su calidad.

Por las características indicadas, el presente libro constituye un hito en la bibliografía de la construcción de las captaciones de agua en medios volcánicos insulares, al que se incorpora, por primera vez, la componente indudablemente minera que comporta. La aplicación de los conceptos que Juan Carlos Santamarta presenta en esta obra mejorarán, sin duda, la gestión de las aguas subterráneas canarias ya que optimizará la investigación y tecnificará la construcción de las galerías de explotación incidiendo positivamente en la seguridad de las mismas.

Enrique Orche García

Dr. Ingeniero de Minas
Catedrático de Prospección e Investigación Minera
Universidad de Vigo

PRÓLOGO del AUTOR

13

La importancia del abastecimiento de agua en un terreno aislado, como son las islas volcánicas oceánicas, justifica sobradamente la realización de un estudio técnico sobre los diferentes aprovechamientos hídricos subterráneos existentes, haciendo especial intensidad en los relativos a las explotaciones mineras. Esta iniciativa, también se justifica, por la ausencia de manuales y documentos especializados relacionados con este tipo especial de minería, que es fundamentalmente, la que aprovecha los recursos hídricos en terrenos volcánicos, si bien, existen explotaciones similares en otro tipo de terrenos con diferentes características, como por ejemplo; en la Comunidad Valenciana, Cataluña y otras partes del País.

Las islas volcánicas tienen una geología singular, que condiciona notablemente, la forma de aprovechar los recursos hídricos. En general, es más compleja que en los territorios continentales. El agua en las islas volcánicas es un activo fundamental para el desarrollo económico y vital de sus habitantes. En el caso particular de Canarias, es uno de los lugares del mundo donde más conocimiento se tiene sobre sus aguas subterráneas y los recursos hídricos en general, pero obviamente hay muchas cosas todavía por hacer e investigar. El recurso hídrico en Canarias proviene principalmente de las galerías o minas de agua, salvo en las islas orientales de Fuerteventura y Lanzarote, que han desarrollado una minería única en el mundo, que se estudia y analiza, en el presente libro.

La islas Canarias tienen similitudes con lo que ocurre en otros sistemas insulares volcánicos, como por ejemplo: Madeira, Jeju (Korea del Sur), Azores, o incluso, el archipiélago de Hawái. En estas islas, el funcionamiento de su hidrología, es similar a Canarias, aunque el aprovechamiento del recurso hídrico, por unas condiciones climáticas mucho más húmedas en dichos archipiélagos, se desarrolla de una manera diferente, aunque se pueden presentar algunas estrategias comunes. Por ejemplo en Canarias, es necesario destacar que los primeros “maestros del agua”, tras la Colonización europea, fueron traídos

de Madeira, para construir acequias y otras obras de almacenamiento. No obstante, en la tecnología minera para captar aguas subterráneas, hay que buscar la relación original, en la tecnología hidráulica árabe, vía la Península Ibérica.

El presente libro, presenta dos partes diferenciadas. Por un lado se introduce en la ciencia necesaria para entender el funcionamiento de los acuíferos en las islas volcánicas, es decir la hidrología e hidrogeología de las islas. Prosigue con la técnica y estrategias de extracción del agua y, se complementa, con un anexo donde se indican las partes fundamentales que debe comprender un proyecto minero de estas características. Confío en que el libro sea de utilidad para los futuros ingenieros que se dediquen a buscar, extraer y aprovechar el agua en las islas volcánicas donde quiera que se construyan estas infraestructuras.

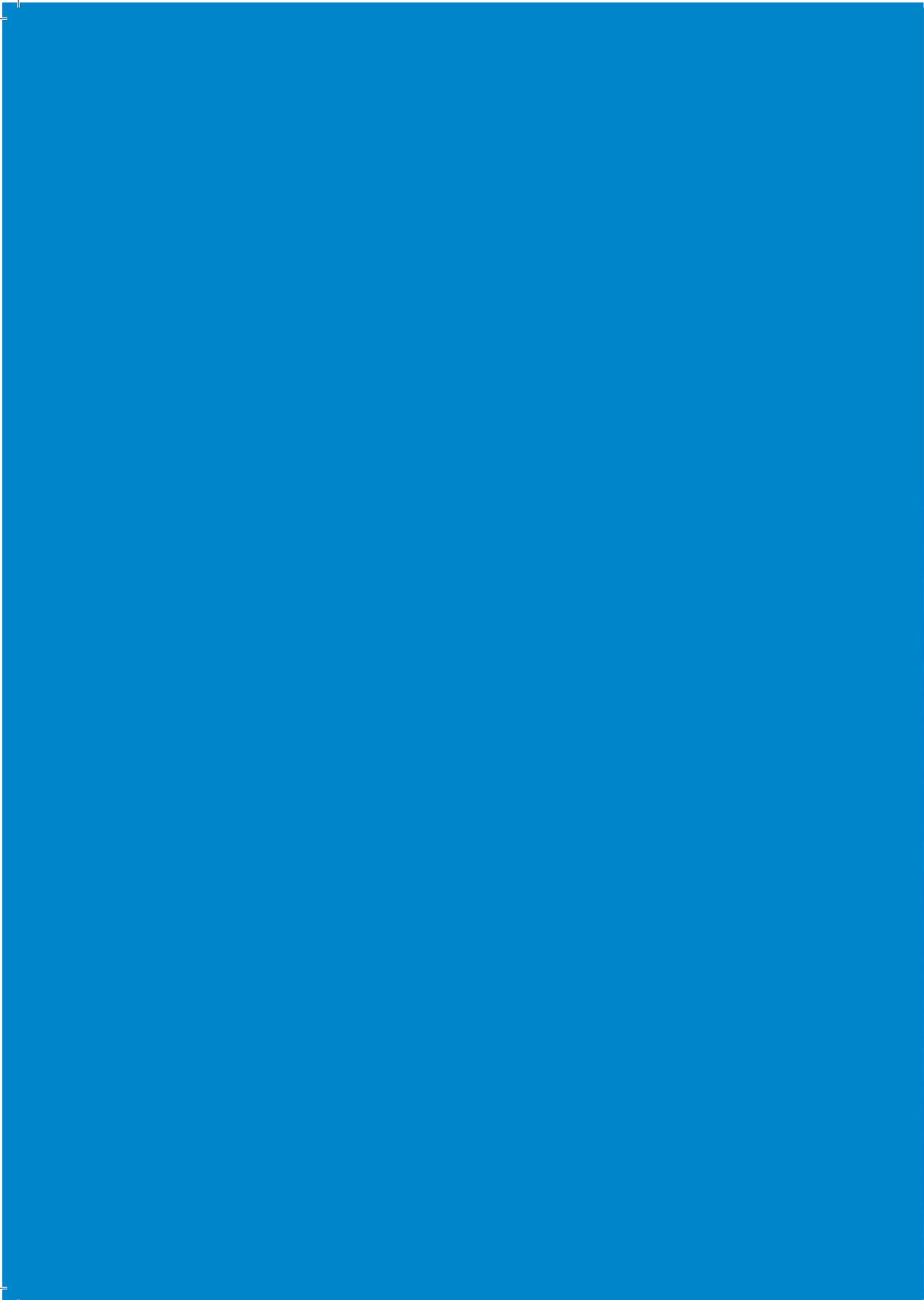
Quiero agradecer la colaboración en dos capítulos, del Doctor D. Rayco Marrero, gran conocedor de la hidrogeología insular y del Ingeniero de Minas, D. Rafael Lario Báscones, con el cual he recorrido numerosas explotaciones y he conocido de primera mano muchas singularidades que desconocía. A Luis E. Hernández Gutiérrez, compañero infatigable de batallas, le agradezco su ánimo y sus aportaciones en materia geotécnica. Gracias también al Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España por la coedición del libro, especialmente a la Decana en las Islas Canarias, Doña Miryam Machado Alique. Aprovecho también estas líneas, para recordar a grandes maestros del agua en las islas como los Doctores D. Emilio Custodio y D. José Sáenz de Oiza, gracias a su conocimiento, dedicación y esfuerzo podemos disfrutar de un aprovechamiento del agua en los terrenos volcánicos, único en el mundo. Por supuesto, no me puedo olvidar del Catedrático D. Enrique Orche, sus consejos, su gran calidad humana y generosidad, son impagables.

Considero que el presente libro puede servir de base a futuros estudios y proyectos, en el área de los recursos hídricos de las islas volcánicas, no solo en Canarias, sino en otros sistemas insulares oceánicos donde pueda ser factible el desarrollar una ingeniería minera del recurso hídrico, de una manera sostenible, que pueda complementar a las actuales soluciones para el abastecimiento hídrico, que pasan por la desalinización de agua de mar. Por supuesto, cualquier sugerencia o crítica constructiva al texto será bienvenida.

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (ETSICCP)
Ingeniería Hidráulica y Energética
Ingeniero de Montes (UPM)
Ingeniero Técnico de Minas (UPM)
Ingeniero Civil (ULPGC)
Ingeniero en Recursos Energéticos (UJA)





PARTE I

VULCANISMO Y RECURSOS HÍDRICOS





CAPÍTULO 1: Vulcanismo y formación de islas volcánicas oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1.1 ISLAS

Una isla es una porción de territorio que se encuentra rodeado por agua. Este terreno puede estar en medio de un río o lago, o bien puede estar rodeado de un mar u océano. En este caso, la isla puede tener dos orígenes, continental o volcánico. Cuando existe una agrupación de islas, geográficamente o geológicamente relacionadas, se denomina archipiélago. Islas, de muy pequeño tamaño —menor de 0,5 hectáreas (ha)—, se suelen denominar islotes.

Las islas continentales, son islas que se encuentran en la plataforma continental. Se pueden formar por diversos procesos, por ejemplo: por los cambios del nivel del mar, debido a la subida de este en la última glaciación —hace 18.000 años—. Islas que se forman, en medio de los ríos, islas que se forman, por la erosión del brazo de tierra que les une al continente, islas de barrera, que se forman paralelamente a la costa, formadas por sedimentos, limo o grava, o bien, formadas por coral. Existen también, grandes islas, que son como micro continentes, que se formaron por la separación del terreno respecto al continente, un ejemplo claro es Madagascar.

Finalmente, están las islas oceánicas —las más interesantes desde el punto de vista de la minería del agua—. Son conocidas, por la denominación de islas volcánicas, atendiendo al origen de su formación: erupción de volcanes en el fondo del océano (puntos calientes o “Hot Spot”, áreas de contacto de las placas tectónicas, cerca de fosas marinas, o bien en dorsales oceánicas) que alcanzan la superficie del mar. En algunos casos, estas erupciones submarinas no llegan a emerger y formar una isla, formándose montañas submarinas (1.1).

Las islas son sistemas aislados, esto ha supuesto evolucionar como unidades ambientales diferentes con respecto a los terrenos continentales en varios aspectos; por un lado la diversidad vegetal —incluyendo endemismos— que presentan la mayoría de las islas. Este efecto es mayor, cuanto más alejada de los continentes esté la isla, todo ello es resultado de una combinación de evolución y aislamiento geográfico. El otro aspecto a considerar es que las islas tienen un ciclo de vida corto, en comparación con los terrenos continentales. Desde su origen, pasan por los siguientes estadios: (i) formación, (ii) crecimiento, (iii) desmantelamiento por grandes deslizamientos gravitacionales y procesos erosivos y, por último, (iv) desaparición bajo el mar.

También comparten características ambientales, económicas y sociales comunes tales como: (i) ecosistemas forestales singulares y especies muy sensibles a pequeñas perturba-



Figura 1.1.- La isla de Madeira, en la región de la Macaronesia.

ciones en los hábitats, (ii) singularidad botánica, (iii) alta presencia del sector primario, (iv) dependencia del turismo como industria, (v) alta dependencia energética pero posibilidad de integrar energías renovables, (vi) elevada densidad de población. Un ejemplo ilustrativo es Hawái, tiene la mayor densidad de población de los Estados Unidos. Incluso a nivel edafológico entre los suelos en las islas volcánicas hay más similitudes que diferencias.

1.2 TEORÍAS DE FORMACIÓN DE LAS ISLAS OCEÁNICAS

Los métodos cuantitativos para el estudio de los volcanes y sus productos están ganando importancia en el campo de la evolución de la vulcanología, por ejemplo; el uso de técnicas cada vez más precisas y accesibles de laboratorio para determinar la composición química de las rocas y minerales. Los vulcanólogos, han desarrollado metodologías para comprender los orígenes y la evolución del magma. Las limitaciones de temperatura y presión estimada a partir de datos químicos son mejoradas por los resultados de estudios geofísicos; en conjunto, estos esfuerzos han conducido a una mejor comprensión de las dimensiones y ubicaciones cámaras magmáticas. Al mismo tiempo, el desarrollo de la capacidad de los equipos informáticos, ha permitido que los vulcanólogos puedan cuantificar sistemáticamente las observaciones de campo que pueden ser numéricamente modeladas mediante el uso de la mecánica de fluidos.

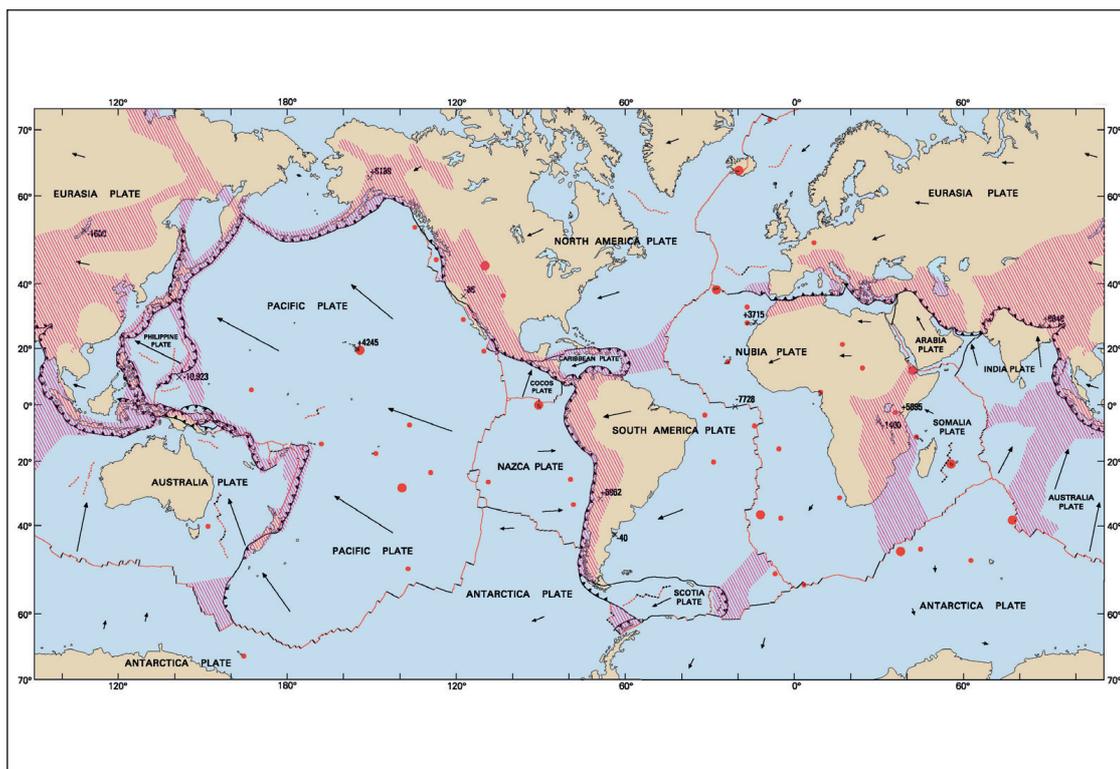


Figura 1.2.- Placas y dorsales oceánicas (USGS, U.S Geological Survey).

Una de las dimensiones, más interesantes de la vulcanología, del proceso de formación de las islas oceánicas, es el vulcanismo. El vulcanismo suele ir asociado a zonas tectónicamente activas. La corteza exterior de la Tierra está formada por una serie de placas tectónicas que se mueven sobre la superficie del planeta. En zonas, donde estas placas se juntan, a veces, se pueden formar volcanes.

Las dorsales oceánicas son unas cordilleras submarinas que se extienden a lo largo de miles de kilómetros, con unas dimensiones de 1.000 kilómetros de ancho y con unas alturas medias de 1.000 a 2.100 metros. Se generan cuando en el manto terrestre se produce un ascenso de rocas fundidas que rompen la corteza oceánica y dan lugar a la formación de una fisura. La mayoría de las erupciones volcánicas ocurren en las dorsales oceánicas. La formación de las dorsales, se explica por la dinámica interna de la tierra que provoca corrientes de convección; ascenso de material caliente desde el interior y posterior descenso tras su enfriamiento. La emisión de esos materiales en las zonas de contacto de las placas es la causa de la génesis de las dorsales oceánicas. En el Océano Atlántico se juntan la placa Norteamericana con la Eurasiática y Africana. La dorsal atlántica recorre todo el Océano de Norte a Sur.

ISLA	EDAD EN MILLONES DE AÑOS (Ma)
Fuerteventura	20,2 Ma
Gran Canaria	14,6 Ma
Tenerife	11,9 Ma
La Gomera	9,4 Ma
La Palma	1,7 Ma
El Hierro	1,1 Ma

Tabla 1.1.- Progresión de las edades de las diferentes islas del archipiélago Canario (Carracedo, 2011)

Cuando las placas tectónicas convergen, se concentran en una zona denominada zona de subducción. Una placa se coloca por debajo de una placa de avance, lo que crea una actividad submarina importante. La placa de subducción va adquiriendo cada vez más presión. El material caliente y vuelto a derretir en subducción, asciende y se filtra hacia la corteza, formando así una serie de volcanes. Estos volcanes pueden formar una cadena de islas conocidas como, “arco insular”.

La teoría del Punto Caliente o “Hot Spot”, se utiliza para explicar el desarrollo de volcanes en zonas de la corteza oceánica no activas tectónicamente, como puede ser el interior de la placa oceánica. La teoría del Punto Caliente asocia el vulcanismo con una anomalía térmica en el manto, seguido de algún tipo de fractura en la corteza inmediatamente superior, el magma ascendería por estas fracturas dando lugar al volcán submarino. Si bien el punto caliente es fijo, la corteza está en movimiento, esto puede llegar a formar una cadena de islas, como ocurre en Hawái o en las Islas Canarias. La teoría de este Punto Caliente fue sugerida inicialmente por Wilson en 1963. En Hawái, esta teoría se evidencia por que los volcanes de las islas Hawaianas son más antiguos mientras más se alejan del punto caliente. Las rocas volcánicas más antiguas están en la isla de Kauai, la isla Hawaiana más occidental y tienen aproximadamente cinco millones de años. En comparación, en la Big Island de Hawái, las rocas más antiguas tienen menos de setecientos mil años de antigüedad. Caso similar ocurre en las Canarias, donde el archipiélago se ha ido construyendo de este a oeste, con diferentes edades geológicas, según la tabla 1.1 .

SISTEMA INSULAR	PAÍS	ORIGEN CIENTÍFICAMENTE RELATIVAMENTE ACEPTADO
Canarias	España	Punto Caliente, "Hot Spot"
Hawái	EE.UU.	Punto Caliente, "Hot Spot"
Aleutianas	EE.UU. & Rusia	Subducción, "arco insular"
Vanuatu	República de Vanuatu	Punto Caliente, "Hot Spot"
Galápagos	Ecuador	Punto Caliente, "Hot Spot"
Reunión	Francia	Punto Caliente, "Hot Spot"
Islas Curiles	Rusia	Subducción, "arco insular"

Tabla 1.2.- Origen de diferentes islas volcánicas oceánicas.

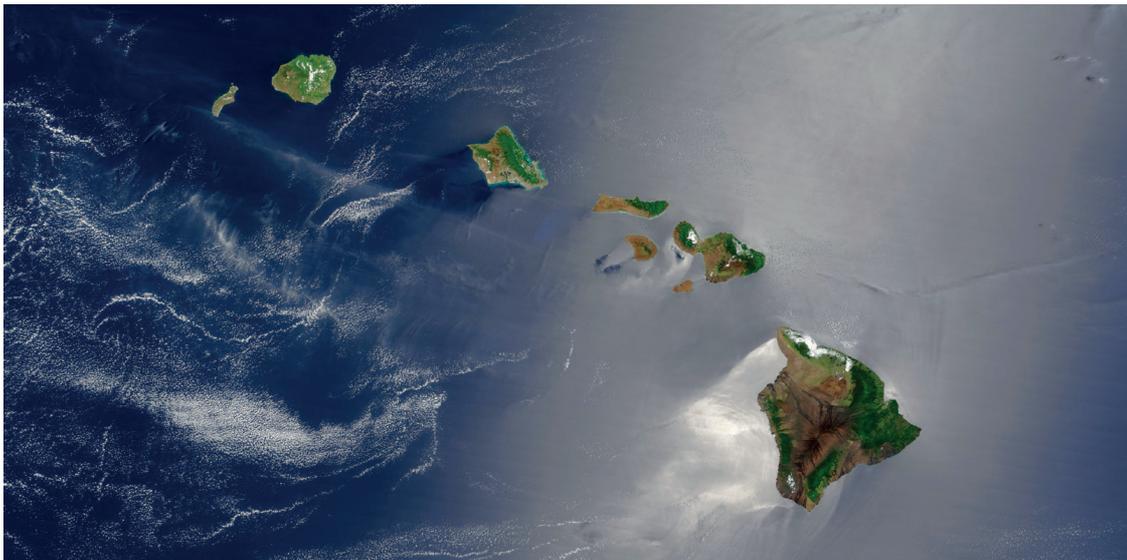


Figura 1.3.- Archipiélago de Hawái, vista desde satélite (Wikipedia).

Particularizando para el caso canario: la edad del vulcanismo disminuye de Este a Oeste, la placa continental del Atlántico se mueve muy lentamente. Las islas más antiguas son Lanzarote y Fuerteventura, de edad media son Gran Canaria, Tenerife y la Gomera, siendo las más jóvenes La Palma y el Hierro, no superando los 2 millones de años (Ma), de antigüedad.

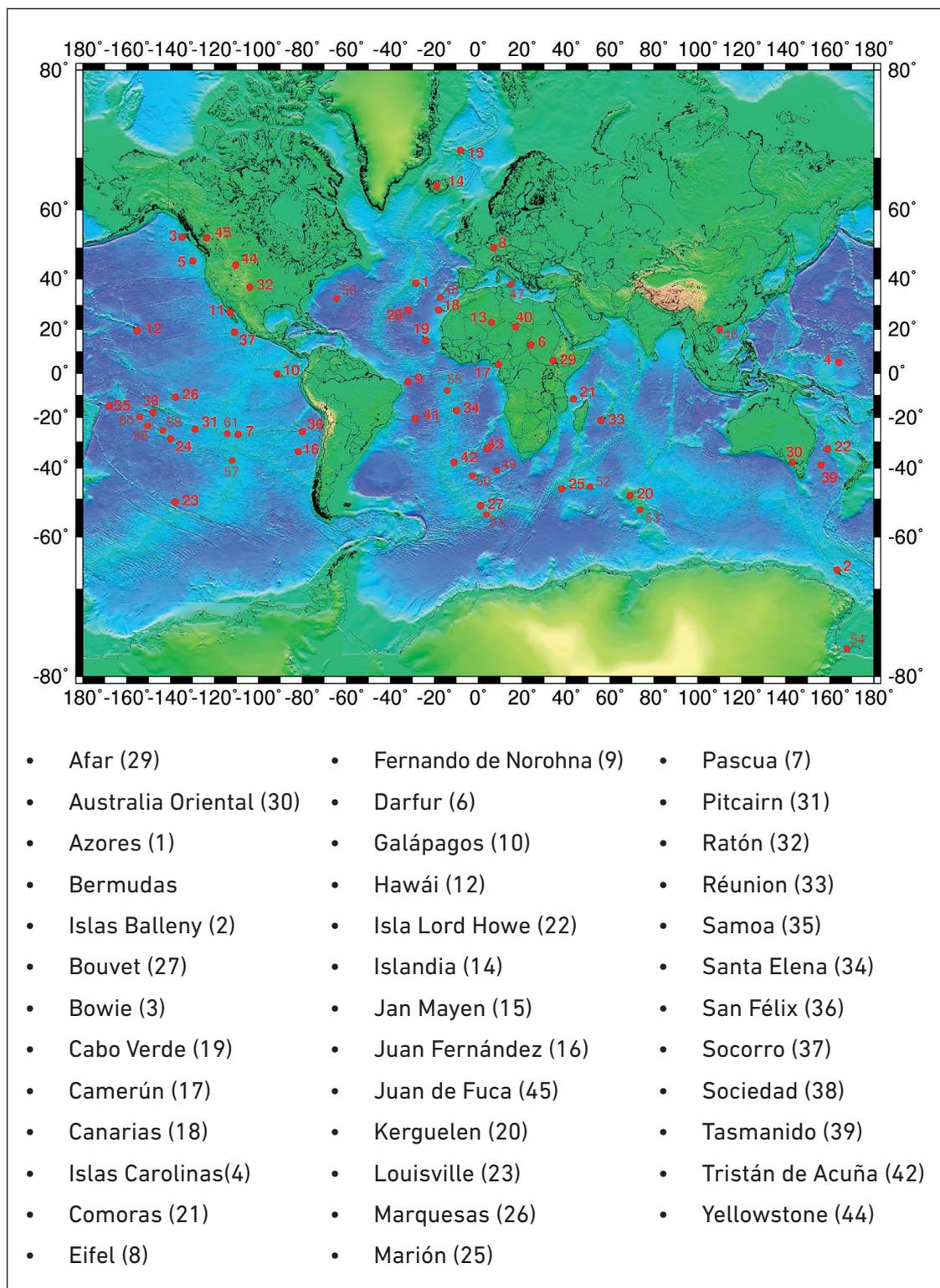


Figura 1.4.- Islas y zonas volcánicas formadas a partir de la teoría del Punto Caliente (Steinberger, 2000).

Existen otras islas, que están cerca de los continentes, en este caso, la isla, no es más que la parte emergente de un único terreno con diferentes alturas. Las zonas más bajas corresponden a terrenos más erosionados, por ser menos duros que otros materiales.

No todos los volcanes submarinos llegan a emerger y formar una isla oceánica, la mayoría se quedan en montaña submarina que no llegó a emerger a la superficie, los llamados “seamount”. Solo en el océano pacífico se han llegado a catalogar más de 10.000 montañas submarinas con esta tipología.

Los volcanes submarinos se detectan por hidrófonos submarinos, los cuales pueden detectar pequeños terremotos. La ubicación de la erupción se puede hacer mediante la triangulación de áreas con varios hidrófonos. También se monitoriza la actividad sísmica, así como cambios en la temperatura y presión.

1.3 TIPOS DE VULCANISMO

El vulcanismo es una manifestación en la superficie terrestre de los procesos magmáticos, los factores que controlan este vulcanismo se pueden resumir en cuatro: (i) la naturaleza del magma, (ii) la forma de extrusión, (iii) la cantidad de volátiles presenten en la erupción y, por último, (iv) si la erupción ocurre en medio subacuático o subaéreo. Los volcanes se pueden definir como una abertura que conecta el magma a la superficie de la tierra. Existen tres estados asociados a los volcanes:

- Volcanes extintos.
- Volcanes inactivos.
- Volcanes activos.

Los volcanes extintos no volverán a entrar en erupción de nuevo, los inactivos no han entrado en erupción en “al menos 2.000 años”, pero pueden entrar en erupción en cualquier momento. Finalmente, los volcanes activos, son considerados como amenazas inmediatas, muestran actividad sísmica y han entrado en erupción recientemente.

El tipo de erupción, explosiva o no explosiva, se determina generalmente por la viscosidad y la concentración de sustancias volátiles, dentro de la lava. Las lavas basálticas generalmente tienen bajas concentraciones de gases. También, con el tipo de erupción, se determina la formación de rocas con diferentes tipos texturales; rocas volcánicas o rocas piroclásticas.

Los volcanes se clasifican en función de la forma, estructura y los materiales que lo forman. La forma que adquiere un volcán depende de la viscosidad de la lava. Una lava con

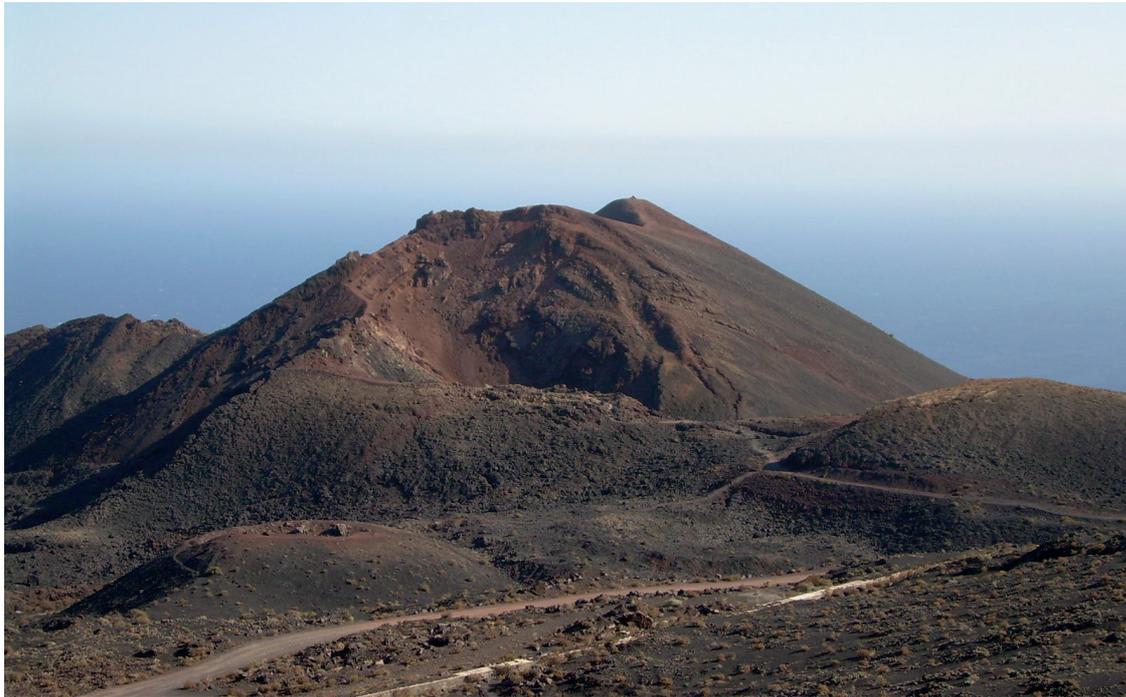


Figura 1.5.- Cono de escoria, en la isla de La Palma, erupción del Teneguía.

alta viscosidad da lugar a volcanes que presentan pendientes más pronunciadas. Volcanes con lavas de baja viscosidad genera edificios con pendientes más moderadas, pero que pueden propagarse a grandes extensiones de terreno. También la forma en la que entran en erupción es importante como criterio de clasificación. Podemos distinguir tres tipos de volcanes:

- Cinder cones o conos de escoria.
- Estratovolcanes.
- Volcanes en escudo.
- Domos de lava.

Los volcanes de escoria, son un tipo de volcán muy común, son relativamente poco peligrosos, son depósitos más o menos soldados de escorias, bombas y lapilli que se acumulan con esta forma geométrica en torno a la boca eruptiva. Alcanzan alturas de 300 a 400 metros. Son creados a partir de una sola abertura de magma, a diferencia de los estratovolcanes o los volcanes en escudo, la estructura es en forma de cono. Su proceso de formación es el siguiente: cuando la erupción ocurre, las cenizas son proyectadas al aire y van cayendo alrededor del foco emisor, formando esa forma característica de cono, ya comentada. Son de pequeñas dimensiones, porque su estructura, es demasiado débil para constituir grandes edificios.



Figura 1.6.- Estratovolcán del Teide, en Tenerife.

Los volcanes estratovolcanes, también denominados, volcanes compuestos, alcanzan alturas considerables, de 2.500 a 4.000 metros sobre el nivel del mar. Su diámetro puede oscilar entre 1 y 12 kilómetros. Su tipo de erupción es muy peligroso y explosivo, con una sucesión de coladas y materiales piroclásticos, además de gases, ceniza, lava, piedra pómez etc. Las laderas tienen importantes pendientes y pueden aparecer conos secundarios en las mismas.

Los volcanes en escudo, tienen pendientes muy suaves, donde pueden aparecer conos secundarios, están formados por la acumulación sucesiva de flujos de lava, a partir de emisiones centrales o fisurales de lavas basálticas, poco viscosas. Sus erupciones no van acompañadas de material piroclástico, esto hace que no sean muy peligrosos. Aunque no son tan elevados como los estratovolcanes, el volumen de material puede ser mucho mayor.

Los domos de lava, provienen de magmas viscosos, tales como los formados a partir de la desgasificación de riolitas o andesitas. Son de menor altura que los anteriores tipos. Generalmente, este tipo de domos de lava se sitúan en los flancos de los volcanes compuestos más grandes.

Si las erupciones son más violentas, de tipo freatomagmáticas, se generan profundos “cráteres de explosión” o mares, cuyo diámetro puede alcanzar unos 2 km, rodeados por anillos de piroclastos con laderas suaves menores que 10°; en consecuencia estos volcanes pasan desapercibidos al observar el relieve desde tierra. Algunos están normalmente rellenos de agua, originando lagos naturales.



Figura 1.7.- Lagos endorreicos en la isla de San Miguel, en Azores.



Figura 1.8.- Cráter del volcán de San Antonio, en La Palma.

Los conos de cinder “ceniza”, se forman en erupciones estrombolianas y, de forma similar, que los de lluvia piroclástica. Son volcanes sencillos que, en su cima, tienen un cráter en forma de cuenco. Raramente ascienden más de 300 metros sobre su entorno. Los fragmentos de magma son expulsados por el volcán en pequeñas explosiones y depositados muy cerca del cráter, de manera que se va acumulando a su alrededor formando una montaña de piroclastos. Sus pendientes son más pronunciadas. Normalmente se originan a causa erupciones, a través de una sola vía de ventilación, a diferencia de los estratovolcanes o volcanes de escudo, los cuales pueden hacer erupción por diferentes fisuras.

Una vez formados los diferentes volcanes, pueden originarse diferentes procesos debido a subsidencias, colapsos y desplomes, originados por la descompresión de la cámara magmática. Estos son:

- Cráteres.
- Calderas.

Los cráteres, forman la cima de los volcanes, están originados por fenómenos de explosión y generalmente por el colapso de las paredes del centro emisor y de la cámara magmática.

Las calderas, son de mayor tamaño que las anteriores, se forman por explosión y descompresión violenta, presentan grandes fracturas circulares. Las calderas pueden ser de dos tipos: el primero, son las calderas de explosión, formadas por colapsos rápidos, son típicas en estratovolcanes; el segundo tipo lo constituyen las calderas de subsidencia, asociadas a subsidencias en volcanes en escudo y sin erupciones explosivas. Algunas



Figura 1.9.- Caldera en la isla de El Hierro.

calderas colapsadas se llenan de agua y forman lagos. Existen también otro tipo de calderas, pero provocadas por procesos volcánicos y erosivos, un claro ejemplo es la isla de La Palma en Canarias, la denominada caldera de Taburiente, donde aparecen componentes del complejo basal: lavas almohadilladas “pillow lavas”, rocas magmáticas plutónicas, diques basálticos y aglomerados.

Las islas oceánicas pueden estar compuestas de un solo volcán, o de varios volcanes, por ejemplo, Hawái “The Big Island”, isla perteneciente al archipiélago del mismo nombre, está compuesto de varios volcanes: Kilauea, Mauna Loa, Mauna Kea, Hulakai and Kohala.

1.4 ETAPAS DE FORMACIÓN DE UNA ISLA

Los puntos calientes o “Hot Spot” tienen una naturaleza diferente que los otros tipos de formación de las islas. Se trata de puntos que, sin estar necesariamente cerca de fronteras entre placas continentales, tienen mayor actividad volcánica que sus alrededores.

El proceso de formación de una isla volcánica, basándonos en la teoría del “Hot Spot”, de forma muy resumida, transcurre por los siguientes estadios: (i) anomalía en el fondo marino, (ii) ascensión del penacho de lava, (iii) erupciones submarinas, (iv) constitución del complejo basal –rocas plutónicas, lavas submarinas, sedimentos–, que forma el edificio

Archipiélago	Crecimiento		Erosión	Subsidencia	
HAWÁI	Volcán Submarino	Fase de emersión y crecimiento rápido	Erosión y volcanismo de rejuvenecimiento	Fase de atolón	Fase de guyot o seamount (monte submarino)
Archipiélago	Crecimiento		Erosión		
CANARIAS	Volcán Submarino	Fase de emersión y crecimiento rápido	Erosión y volcanismo de rejuvenecimiento	Fase de erosión y volcanismo residual	Fase de erosión

Tabla 1.3.- Ciclo de vida de las islas volcánicas (con subsidencia importante como Hawái o sin ella, como Canarias). Adaptado de (Carracedo & Tilling, 2003).

volcánico submarino, (v) series volcánicas subaéreas, –áreas emergidas de las islas–. Los edificios insulares se elevan desde los fondos marinos, sólo una parte son visibles sobre el nivel del mar (menos del 10%), (vi) en superficie; se van desarrollando series de erupciones, en ocasiones se denominan como serie I, serie II, serie III..., atendiendo a la antigüedad de las mismas. Finalmente, (vii) edificios volcánicos recientes, que pueden incluir erupciones históricas. Por lo tanto, la geología de las islas se forma mediante la sucesión de materiales y estructuras geológicas, incluyendo depósitos de piroclastos –cenizas volcánicas–. Cabe destacar que algunas islas tienen procesos volcánicos en activo, en Europa podemos destacar, Sicilia, Islandia y recientemente la Isla de El Hierro (2011), en Canarias.

Todas las islas volcánicas oceánicas, pasan, durante su formación, por unas etapas similares a lo largo de su historia y que se reflejan en una serie de grandes unidades volcanoestratigráficas; si bien, el desarrollo de cada una de ellas se produce en tiempos diferentes en las distintas islas. Estas unidades son dos:

- Complejo Basal; los edificios insulares se elevan desde los fondos marinos, por lo que solo una pequeña parte de ellos es visible sobre el nivel del mar, como se comentó. Una parte de este complejo basal puede aparecer en superficie, se considera impermeable, son terrenos interesantes para planificar embalses, como así ha ocurrido en La Gomera (Vallehermoso), en Canarias.

- Series volcánicas subaéreas, esta estructura, cuanto más antigua más impermeable y, por lo tanto, más compactada se encuentra por el peso de las capas superiores, se suelen nombrar por series (I, II, III...).

La primera formación que se construye es el volcán submarino, el magma bajo presión asciende, creando cámaras magmáticas dentro o por debajo de la corteza. Las grietas en las rocas de la corteza oceánica proporcionan una salida para la intensa presión, y tiene lugar la erupción. Vapor de agua, humo, gases, cenizas, rocas y lava son lanzados a la atmósfera. Las rocas acumuladas en la cámara magmática, se enfrían lentamente, forman las rocas plutónicas como la sienita, gabro y las carbonatitas, estas últimas tienen un contenido superior al 50 % de carbonatos primarios. Cuando las rocas fundidas contactan con el agua, se solidifican muy rápidamente. El enfriamiento rápido del magma o lava hace que se formen rocas con muchos cristales pequeños o granos finos. La base de la isla o complejo basal está formado por este tipo de rocas (plutónicas y volcánicas), las cuales se mezclan con sedimentos marinos. Todo el complejo está atravesado por numerosos diques. El complejo basal posee los materiales más antiguos de la isla, puede aflorar en superficie, de ahí, que se pueda observar en La Palma, Gomera y Fuerteventura.

Una vez que las erupciones alcanzan el nivel de superficie del mar aparece el vulcanismo subaéreo, en el cual hay grandes emisiones de material mientras que la isla se edifica sobre el edificio submarino. Esta fase se denomina etapa de construcción en escudo y tarda en asentarse, en algunos casos, varios millones de años. Pueden generarse estructuras o dorsales por donde se van alineando los volcanes en escudo (si hay varios). En ocasiones se forman estratovolcanes con magmas más viscosos y erupciones más explosivas dando lugar a volcanes con grandes alturas como el Teide en Tenerife (3.718 metros). Las islas pueden ser formadas con un estratovolcán en forma circular, como el caso de La Gomera, en la islas Canarias.

Tras esta fase, aparece un periodo de relativa calma, en el cual se dan importantes fenómenos de erosión. La precipitación va horadando la isla mediante numerosos barrancos de manera radial, estos barrancos inicialmente son profundos y en forma de “V”, principalmente, cuando son jóvenes. Cuando va pasando el tiempo se van ensanchando hasta describir una forma en “U”. Algunos autores denominan esta etapa como discordancia erosiva.

En las islas volcánicas, puede existir una etapa posterior, denominada de rejuvenecimiento. En esta etapa, existen nuevas erupciones, más explosivas, con una diversificación de los materiales emitidos, como por ejemplo las fonolitas y traquitas de naturaleza sálica. No se sabe a ciencia cierta por qué ocurre esta nueva fase de erupciones, la explicación más popular sugiere que la litosfera hace como una especie de “rebote” tras haber estado oprimida, esta despresurización puede conducir a la fusión y generación de magma.



Figura 1.10.- Restingolitas, productos volcánicos expulsados en la primera fase de la última erupción en la isla de El Hierro.

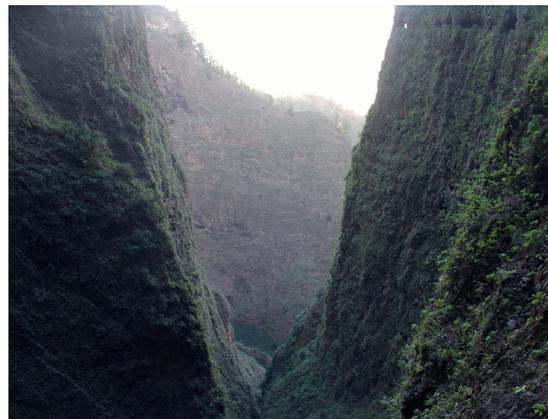


Figura 1.11.- Barrancos en V, en la isla de Tenerife. (Foto cortesía Francisco Puerta).



Figura 1.12.- Barrancos en la caldera de Taburiente, los procesos erosivos y la carga sólida presente es evidente.

El último estadio de las islas es la desaparición bajo el mar a causa de los diferentes procesos de erosión. En el caso de las islas del Pacífico se forman atolones o islas de coral, antes de esta desaparición. Los atolones son arrecifes de coral que crecen en forma circular, en la mayoría de los casos, rodeando una laguna formada por el antiguo volcán. También en caso del archipiélago hay que destacar el fenómeno de la subsidencia, sobre todo en zonas cercanas al Punto Caliente, dado que en ese punto es donde está debilitada la litosfera por los procesos térmicos allí acontecidos. Estudios realizados por Moore en 1987, indican una subsidencia de unos 2,5 mm por año.

A modo de ejemplo, las islas Canarias se encuentran en las siguientes fases: Lanzarote y Fuerteventura están en la fase de erosión y con una reciente actividad volcánica, en el caso de Lanzarote. Gran Canaria y Tenerife están en fase de post escudo con vulcanismo rejuvenecido. La Gomera, donde ha finalizado la fase de escudo, se encuentra en la fase de erosión, es posible que esta isla no pase por la fase de rejuvenecimiento por vulcanismo activo, dado que hace del orden de 2-3 Ma, que no ocurren erupciones, lo que daría pie a presuponer que las fisuras volcánicas por donde podría ascender el magma están selladas. Finalmente, Hierro y La Palma, se encuentran en el Punto Caliente y por lo tanto se considera que están en la fase de construcción del escudo.

1.5 MATERIALES VOLCÁNICOS

1.5.1 Introducción

Existen varios tipos de volcanes en función de la acidez de la lava y la tipología de las explosiones, aunque por ejemplo en Canarias se dan todos los tipos de materiales volcánicos (Hernández-Gutiérrez, 2011) de ahí que sean tan importantes para la comunidad científica.

Inicialmente debemos distinguir entre magma y lava. El magma se utiliza para definir la roca fundida que no ha aflorado en superficie y el término lava se utiliza para referirse a la roca fundida, cuando alcanza la superficie de la tierra. Cuando los magmas alcanzan la superficie de la Tierra y se enfrían y solidifican en condiciones subaéreas o subacuáticas, las rocas que resultan se denominan extrusivas o volcánicas. La diferenciación del magma del que proceden las rocas volcánicas produce que su composición química pueda variar gradualmente en su ascenso hacia la superficie, dando lugar a diferentes rocas volcánicas en función de los diferentes puntos de fusión de los compuestos químicos fundidos que lo componen y de su velocidad de enfriamiento. Los productos que arrojan los volcanes son muy variados y se pueden clasificar según los diferentes estados físicos en que se encuentren en: gaseosos, líquidos, viscosos y sólidos.

Las estructuras de enfriamiento pueden formar: las diaclasas (juntas o fracturas) sin desplazamiento. Se forman durante el enfriamiento del magma, como el material caliente

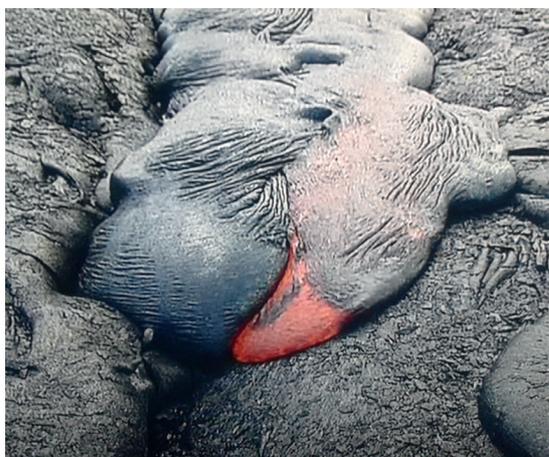


Figura 1.13.- Lava volcánica.

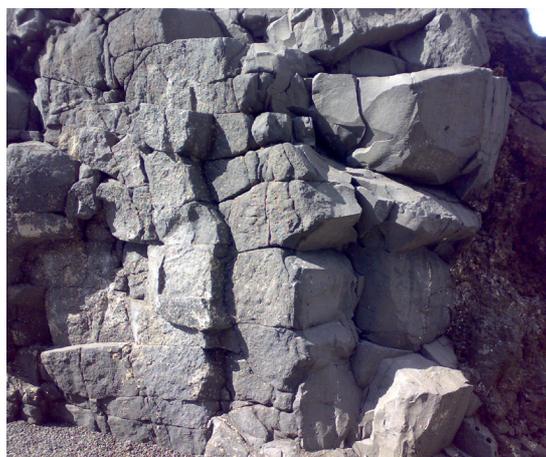


Figura 1.14.- Diaclasado en el enfriamiento del basalto.

ocupa más espacio que la misma cantidad de materia fría, al enfriarse el magma, se producen fracturas por la diferencia de volumen que se produce. Por otro lado se producen columnas basálticas. La formación de estas columnas se produce porque la lava basáltica, al enfriarse, se solidifica, pero disminuyendo su volumen, de modo que se fracciona en forma de prismas. El tamaño de las columnas viene determinado por la velocidad de enfriamiento, siendo las más grandes producto de tiempos de enfriamiento más largos. Ambas formaciones, diaclasas y columnas, indican flujo subaéreo.

1.5.2 Rocas volcánicas

Las rocas volcánicas se originan cuando el magma se enfría en la superficie terrestre en condiciones de temperatura y presiones bajas. Cuando los volcanes entran en erupción, el material primario emitido es el basalto fundido, que fluye en forma de lava viscosa. El color de la lava depende de la temperatura del flujo, su composición química e impurezas. Ese material va acompañado de gases, principalmente CO_2 y vapor de agua. En grandes cantidades forma nubes blancas, cuando está sobrecalentado y lleva consigo partículas de roca caliente, constituyen los piroclastos.

Las rocas volcánicas tienen una serie de características importantes para su identificación. Su textura puede ser vesicular, con huecos o burbujas los cuales se moldearon por los gases emitidos durante la erupción. La textura vesicular se presenta sobre todo en las partes superiores de la colada. Textura amigdaloides, cuando esos huecos se rellenan mediante minerales secundarios.

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Basalto	Roca volcánica lávica. Carácter básico. Una de las rocas más abundantes de la corteza terrestre. Sus minerales esenciales son el olivino y la plagioclasa. Pobre en Silicio (Si) y rica en Hierro (Fe). Colores oscuros. Básicas o máficas (hierro y magnesio).
Andesita	Su composición mineral comprende generalmente plagioclasas y varios otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda. Textura fanerítica, con pequeños granos que en ocasiones se pueden apreciar. Tras el basalto es la roca volcánica más abundante. Colores grisáceos.
Dacita	Textura fina, con alto contenido en hierro. Composición entre la andesita y la riolita.
Riolita	Ácida. Su composición química es la del granito. Rica en Si y pobre en Fe. Silíceas o félsicas. Estructura afanítica (cristales pequeños difíciles de apreciar a simple vista). Colores claros.
Pumita	Acumulación de cenizas volcánicas en una nube ardiente. Roca con densidad muy baja y gran porosidad. Formadas por sílice y aluminio principalmente. Se forma a partir de magmas muy ácidos, y por lo tanto muy viscosos. Rica en vacuolas, como consecuencia de la liberación de gases. Color de gris claro a amarillo.
Traquita	Compuesta fundamentalmente por feldespato alcalino. Su estructura es porfídica pero rara vez vítrea. Sin cuarzo, sin feldespatoideos. El equivalente plutónico de la traquita es la sienita.
Fonolita	Fuertemente alcalina, de acidez intermedia, que contiene esencialmente feldespatos alcalinos y feldespatoideos.
Obsidiana	Vidrio volcánico. Textura vítrea, sin granos. Está constituida por una pasta uniforme que no presenta cristales. Elevado porcentaje de sílice y silicatos alumínicos. Color negro o verde oscuro.

Tabla 1.4.- Algunas características de las rocas volcánicas.

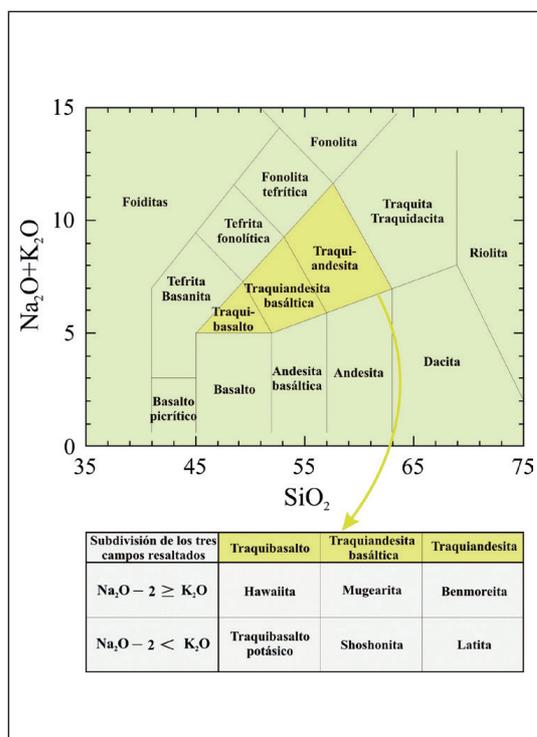


Figura 1.15.- Rocas volcánicas, diagrama TAS (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013).

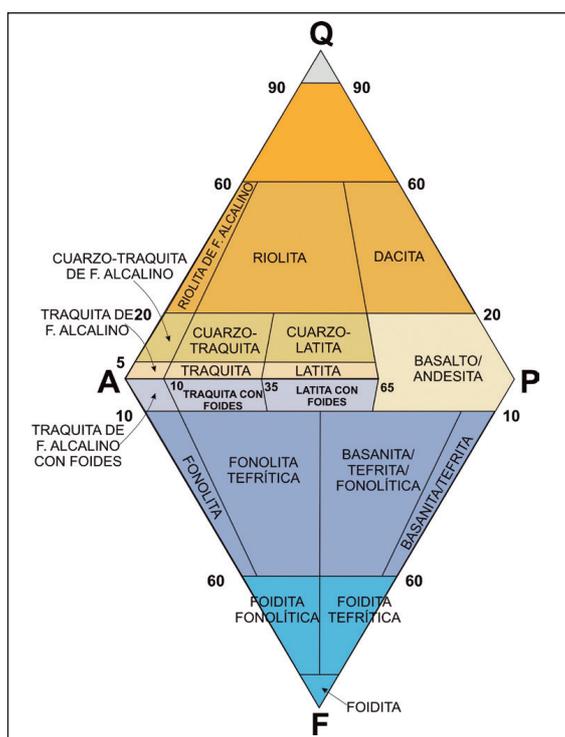


Figura 1.16.- Rocas volcánicas, diagrama QAPF (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013).

Para las rocas volcánicas se utiliza el diagrama TAS (Total Alkalies vs Silica). En este diagrama no se utilizan términos modales (máfico, félsico, etc.) sino químicos: rocas ultrabásicas, básicas, intermedias, y ácidas, en función de la abundancia de SiO₂ en porcentajes en peso (ver figura 1.15).

El diagrama QAPF es un doble diagrama triangular utilizado para clasificar rocas ígneas en base a su composición mineralógica. El acrónimo, QAPF, corresponde a “Cuarzo (Quartz), feldespato alcalino (Alkali feldspar), Plagioclasa, Feldespatoide”, donde los porcentajes de Q, A, P y F están normalizados (ver figura 1.16).

1.5.3 Lavas

Existen dos tipos de lava, en función de la temperatura de fundición y material constituyente, las lavas ácidas, de colores claros. Se funden a temperaturas más altas y se solidifican con mayor rapidez y fluyen a cortas distancias de su origen, —andesitas, traquitas o dacitas—. Por otro lado, están las lavas básicas, de colores más oscuros; a diferencia de



Figura 1.17.- Lavas cordadas.

las ácidas, se funden a una temperatura más baja y fluyen a grandes distancias y además se solidifican lentamente al enfriarse y originan la lava acordonada —Basaltos—. Las temperaturas medidas en las coladas de lava van desde 900°C a 1.200°C. La velocidad de avance y los alcances de los flujos de lava son muy variables. El rango habitual es 5 a 1.000 metros a la hora.

El basalto es una roca ígnea, que tiene un aspecto oscuro y contiene altos niveles de hierro, magnesio y potasio. La viscosidad del basalto, cuando está fundido en forma de lava es un factor determinante, dado que influye directamente sobre la resistencia que presenta la lava a fluir. La viscosidad está condicionada por la temperatura y la presencia de gases; a mayor temperatura, menor es la viscosidad, así, un flujo de lava puede discurrir de manera rápida inicialmente, pero a medida que se aleja del foco emisor y la temperatura disminuye, su viscosidad, va en aumento. La presencia de los gases, principalmente CO₂ y vapor de agua, influyen en la viscosidad de la lava, a concentraciones elevadas la viscosidad disminuye por lo que aumenta la fluidez de la lava, cuando la cantidad de volátiles desciende, la viscosidad aumenta. Las lavas, las están formadas por las siguientes sustancias químicas: H₂O, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, Fe₂O, MgO, CaO, Na₂O y otras sustancias, sin embargo, el promedio o porcentaje de éstas varía según los distintos tipos de lavas.

TIPO DE ROCA VOLCÁNICA	ESTRUCTURA VOLCÁNICA MÁS COMÚN
LAVAS BASÁLTICAS	Volcanes en escudo Conos cineríticos
LAVAS ANDESÍTICAS O INTERMEDIAS	Estratovolcanes
LAVAS RIOLÍTICAS	Domos

Tabla 1.5.- Tipo de lava y estructura volcánica común asociada

Hay dos tipos fundamentales de lava formadas por el basalto: las “pahoehoe”, de tipo suave y denso, pueden formar grandes áreas, formando asentamientos de superficie. A veces están modeladas en forma de pliegues, se denominan entonces lavas cordadas, en alusión al aspecto de su superficie; por otro lado están las lavas “aa”, que forman rocas individuales con tamaños que van de pocos centímetros a varios metros, con alta porosidad y muy irregulares, aunque debajo de la superficie son muy densas. En el campo es fácil su diferenciación, y más, si se tiene en cuenta una diferencia notable a nivel práctico: es muy difícil caminar por las lavas “aa” y fácil por las “pahoehoe”.

Otro tipo de lava singular, son las lavas almohadilladas o “pillow lavas”, son estructuras en forma de almohada, tubulares, bulbosas o esféricas, que se atribuyen a la extrusión de la lava bajo el agua. Su estructura interna muestra una parte externa de grano fino, con pocos cristales, dado su rápido enfriamiento y una capa interna de grano grueso con cristales grandes. Dependiendo de la profundidad a la que se forman pueden tener cantidades variables de vesículas. Son un clásico indicador geológico que muestra que esa zona una vez estuvo bajo el agua, aparecen usualmente en los complejos basales de las islas, por ejemplo; en la caldera de Taburiente, en La Palma.

La lava de bloques es otro tipo de flujo muy común en volcanes con productos más ácidos y viscosos. Estos bloques de lava, con su interior incandescente, descienden por la pendiente de un volcán en forma de pequeñas avalanchas, las cuales evolucionan ladera



Figura 1.18.- Lavas "aa".



Figura 1.19.- "Pillow lavas".

abajo, formando capas de lava similares a las de un flujo líquido. Este tipo de estructuras aparece asociada a lavas de composición traquítica o fonolítica.

En ocasiones se pueden formar los tubos de lava cuando la capa exterior de un flujo de lava se enfría y se solidifica. La lava no expuesta al aire permanece caliente y continua fluyendo. Una vez que todo el flujo cesa, todo lo que queda, se transforma en un túnel o canal sólido. Estas estructuras pueden variar mucho en tamaño.

1.5.4 Piroclastos

Los piroclastos, son materiales fragmentados emitidos por una erupción volcánica en forma sólida o fluida, —nubes de piroclastos—. Los depósitos piroclásticos, atendiendo al mecanismo de transporte y emplazamiento pueden denominarse:

1. Ash fall, depósitos piroclásticos de caída.

a. Escorias.	e. Cenizas.
b. Bombas.	f. Pómez.
c. Bloques.	g. Brechas.
d. Lapilli.	

2. Ash flow, coladas piroclásticas.

a. Ignimbritas no soldadas.	b. Ignimbritas soldadas.
-----------------------------	--------------------------

3. Surge, oleadas piroclásticas.

PROCESO VOLCÁNICO	PRODUCTO VOLCÁNICO
Flujo de lava	Colada volcánica
Caída de piroclastos	Depósitos piroclásticos
Flujo piroclástico de densidad caliente	Ignimbritas (soldadas, no soldadas)
Flujo de oleada piroclástica de densidad caliente	“Surge”

40

Tabla 1.6.- Procesos volcánicos y productos asociados.

El primer caso son los “ash fall”, que forman depósitos piroclásticos de caída, cubren uniformemente la topografía, la potencia del depósito disminuye al aumentar la distancia al foco emisor.

1.5.5 Depósitos piroclásticos

Los depósitos piroclásticos se clasifican, en función de las condiciones en que la columna eruptiva interacciona con la atmósfera, el grado de explosividad y la composición del magma. Según la Guía para la planificación y realización de los estudios geotécnicos para la edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias los piroclastos también se pueden clasificar como depósitos, en ese caso se puede hablar de tres tipos:

- Depósitos plinianos.

Formados a partir de columnas eruptivas estables o columnas plinianas, en las cuales las partículas de pómez son eyectadas a elevada altitud y posteriormente arrastradas, dispersadas por el viento y depositadas posteriormente en el terreno en forma de lluvia piroclástica.

- Depósitos de ignimbritas.

Formados a partir de columnas eruptivas gravitatoriamente inestables o vulcanianas. En este caso, la columna eruptiva sufre un colapso parcial o total de la misma, generándose una nube ardiente de elevada densidad de partículas con una masa interna en la que, las



Figura 1.20.- Piroclastos en las Cañadas del Teide.

partículas de pómez y cenizas mezcladas de forma caótica, son mantenidas en suspensión por la masa de gases.

- Conos de cinder (conos de escoria).

Muy abundantes en la geografía insular de Canarias. Como se ha comentado en anteriores secciones, se forman en erupciones estrombolianas y de forma similar a los de lluvia piroclástica; los fragmentos de magma son expulsados por el volcán en pequeñas explosiones y depositados muy cerca del cráter, de manera que se va acumulando a su alrededor una montaña de piroclastos que constituye por sí misma el volcán estromboliano o cono de cinder. Al contrario que los piroclastos de las erupciones plinianas (de composición traquítica o fonolítica), éstos tienen composición basáltica y son conocidos en la terminología local como picón, jable o zahorra.

Los depósitos de piroclastos son excelentes elementos de correlación estratigráfica, son bien reconocibles y datables, por lo tanto suministran una información muy valiosa. Pueden formar las rocas piroclásticas. Cuando los depósitos piroclásticos se encuentran soldados se suelen denominar *toba*, cuando se encuentran sueltos *tefra*. Cuando los piroclastos son de composición ácida se denominan pómez y adquieren un característico color blanco, es un material rico en vesículas. Debido a su baja densidad menor de 1 g/cm^3 , flotan en el agua, cuando se trata de un depósito compacto, se denomina al conjunto *pumita*.

Por último están las brechas, se forman frecuentemente en erupciones violentas, en las primeras fases de apertura del conducto eruptivo, forman depósitos muy caóticos y mal clasificados.



Figura 1.21.- Depósitos piroclásticos en Tenerife.



Figura 1.22.- Bombas volcánicas en las Cañadas del Teide en Tenerife.

42

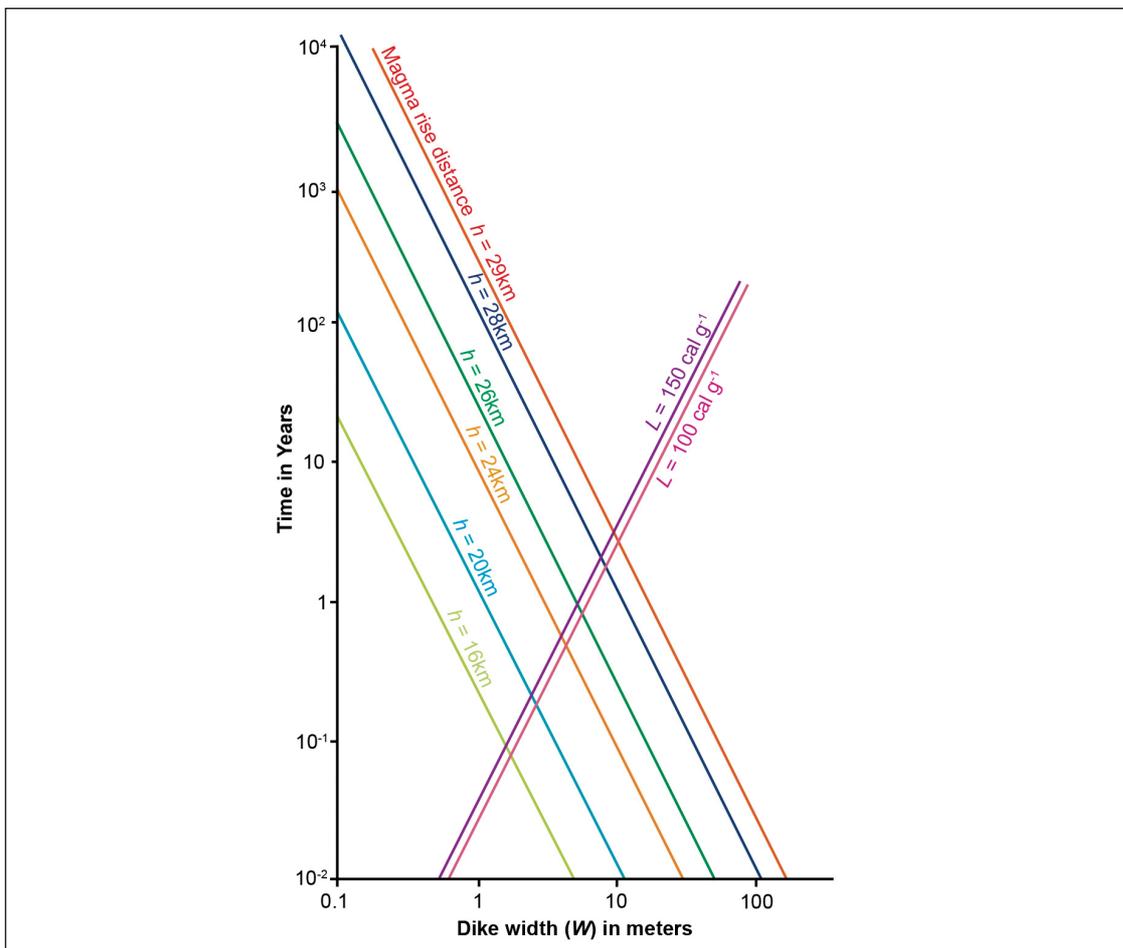


Figura 1.23.- Relación entre la altura del ascenso del magma (h) y la anchura del dique (w), así como el tiempo de cristalización con respecto a w y el calor latente de cristalización (L) (Szekely & Reitan, 1971).

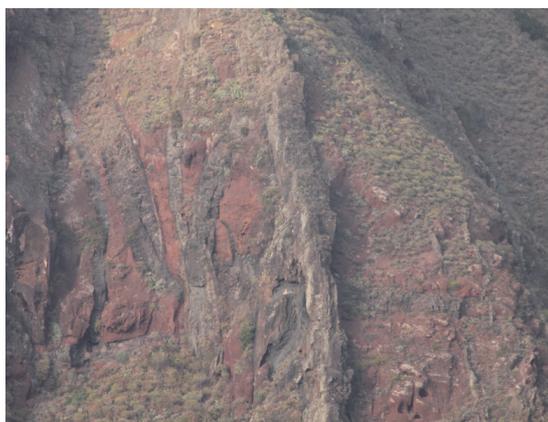


Figura 1.24.- Dique geológico.



Figura 1.25.- Dique geológico y depósitos piroclásticos.

1.5.6 Diques

Los diques volcánicos son flujos de magma ascendente, más o menos verticales, que atraviesan formaciones más antiguas. Se forman a partir de la intrusión de rocas fundidas en fracturas de tensión formadas bajo la acción del campo de esfuerzos regional, asistidas, en este caso, por la alta presión del fluido volcánico. En el interior de un edificio volcánico es típico que esté atravesado por cientos de diques de diferentes tamaños, concentrándose en la zona central de la erupción, generalmente donde existe una mayor debilidad estructural dentro del edificio volcánico. Los anchos de estas paredes verticales son variables, y según Szekely & Reitan (1971), dependen de la distancia vertical hasta la fuente de magma.

A medida que el magma asciende, la temperatura del conjunto disminuye. La reducción de la temperatura hace aumentar la viscosidad del magma. Este aumento hace que se vaya obstruyendo la vía por donde ascendía el magma, con ello se reduce la fuerza y velocidad de ascensión del magma, aumenta el proceso de cristalización del conjunto.

Hay unos parámetros aproximados, en la formación de los diques que se pueden asumir, estos son:

1. La difusividad térmica¹ del magma, $4 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$.
2. La difusividad térmica de la roca circundante, $6 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$.
3. Temperatura inicial del magma, a la cual todavía es líquido $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Temperatura en la cual el dique se cristaliza $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Temperatura inicial de la roca circundante $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

1. La difusividad térmica mide la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de un material. Dicho de otra forma, es la tasa de cambio con que un material aumenta de temperatura, al ser puesto en contacto con una fuente de calor.

DENOMINACIÓN	TAMAÑO	FORMA
BOMBAS	Mayor de 64 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Forma redondeada. • Total o parcialmente fundido durante su formación y transporte. • Grietas de contracción.
BLOQUE	Mayor de 64 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Angulosa o subangulosa. • Estado sólido durante su formación y transporte.
LAPILLI	Entre 64 y 2 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Formas variadas. • Negro inicialmente, cambia a rojo por procesos de oxidación. • Si forma depósito compacto se denomina <i>toba</i>.
CENIZA	Menor de 2 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Grano, polvo. • Cuando forma depósitos de denomina cinerita o <i>toba cinerítica</i>.

Tabla 1.7.- Denominación de los piroclastos en función del tamaño y forma.

Los diques suelen meteorizarse más lentamente que las rocas circundantes. Cuando afloran, como consecuencia de la erosión, tienen el aspecto de una pared. En las islas volcánicas, la posición, dimensiones y estado de fracturación de los diques es un factor fundamental a tener en cuenta a la hora de estudiar su hidrogeología, tal y como se verá en las próximas secciones.