

Universidad de La Laguna  
Escuela de Doctorado y Estudios de Doctorado

# Caracterización de la emisión gaseosa en el subsuelo de las Islas Canarias a través de las infraestructuras de captación de aguas subterráneas. Aplicación a la vigilancia volcánica

Pedro Antonio Torres González

Tesis Doctoral

Programa de Química e Ingeniería Química

Directores:  
Ana Isabel Jiménez Abizanda  
Vicente Soler Javaloyes

Tutor:  
José Manuel García Fraga

Septiembre 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

1 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

2 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Universidad de La Laguna

Escuela de Doctorado y Estudios de Doctorado



# Caracterización de la emisión gaseosa en el subsuelo de las Islas Canarias a través de las infraestructuras de captación de aguas subterráneas. Aplicación a la vigilancia volcánica

Pedro Antonio Torres González

Tesis Doctoral

Programa de Química e Ingeniería Química

San Cristobal de La Laguna, Tenerife

Septiembre 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

3 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

4 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Agradecimientos

Esta es, sin duda, la sección más complicada de escribir y no por su 'complejidad técnica', sino porque seguramente no pueda encontrar las palabras adecuadas con las que expresar mi enorme gratitud a todas aquellas personas que, de alguna u otra forma, han contribuido a que este barco llegase a buen puerto. Aun así, lo voy a intentar.

En primer lugar quiero, y debo, darle las gracias a David. No solo por ser el mejor compañero que alguien pueda tener sino por ser el mejor amigo que uno pueda desear. Esta Tesis no podría haberse llevado a cabo sin tus 'cacharros', y lo sabes. Gracias por las innumerables jornadas de trabajo, *cacharreo* y amistad.

Nati, infinitas gracias por todo. Primero por tu amistad, que es el mejor regalo. Gracias por servir de guía, ayudarme, animarme y empujar para que este barco no se hundiera. También tienes mucha culpa de que esta Tesis se haya completado.

Para Víctor Villasante e Ilazkiñe no tengo más que palabras de gratitud. Por ayudarme con la redacción de los artículos y con el trabajo de campo de esta Tesis, pero sobre todo por su amistad.

Aún recuerdo aquel día en los que recorrí los pasillos de la facultad de química en busca de alguien que quisiera enrolarse en esta tripulación. Nunca pude imaginar la enorme suerte que tendría. Ana y José, José y Ana, para mí siempre serán mis '*químicos*' de referencia. Una dupla indivisible. Muchísimas gracias por tener el valor de embarcarse en una travesía por un mundo tan desconocido para ustedes. Gracias Ana por tu colaboración, paciencia, aportaciones y ayuda. Gracias a ti también José, no solo por lo mismo, sino por tu gran espíritu crítico.

Estoy enormemente agradecido al Instituto Geográfico Nacional (IGN), institución de la que actualmente formo parte, por darme la oportunidad de explorar nuevas áreas del conocimiento como es la geoquímica de gases volcánicos. En especial darle las gracias a María José Blanco por su ayuda y paciencia en aguantarme. También quiero dar las gracias al resto de compañeros del IGN, que de alguna u otra forma colaboraron en las tareas de campo e infinitos debates sobre los datos.

Vicente, gracias por tus aportaciones e ideas, pero sobre todo por ayudarme a dar los primeros pasos en este maravilloso mundo de la volcanología. Gracias.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

5 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6

*Walter, ti ringrazio per insegnarmi i segreti della geochimica e per l'aiuta per scrivere gli articoli. Anche voglio ringraziare a tutti colleghi a Palermo.*

Mis más sinceros y profundos agradecimientos van dirigidos a los míos. A las tres personas más importantes en mi vida. A mi madre y mi hermano, por estar cerca de mi y apoyarme cada día. A Lidia por estar siempre a mi lado, apoyándome en todo momento y por su incondicional amor. Gracias a los tres de corazón.

No puedo despedirme sin recordar a alguien muy importante que nos dejó en mitad de esta travesía. Sabes que siempre, estés donde estés, nos acordamos de ti. Estoy aquí gracias a ti porque caminamos a hombros de gigantes. Gracias papá.

Pedro

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

6 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

7 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

8 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

9

*Dedicado a mi padre.*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

9 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

9 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

10 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

11

*"...a hombros de gigantes..."*

- Bernardo de Chartres (1070-1130) -

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

11 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

11 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

12 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Índice general

Índice de figuras	17
Índice de tablas	23
<b>1. Introducción</b>	<b>25</b>
1.1. Objetivos	26
1.2. Estructura de la Tesis	29
<b>2. Marco geodinámico y geológico</b>	<b>31</b>
2.1. Marco geodinámico	32
2.2. Origen	33
2.3. Geología y volcanismo	34
2.4. Volcanismo histórico	36
<b>3. Vigilancia volcánica</b>	<b>39</b>
3.1. Sismología	39
3.2. Geodesia	42
3.3. Geoquímica	44
3.4. Geología	55
3.5. Otras técnicas	56
<b>4. Minería del agua</b>	<b>59</b>
4.1. Galerías	60
4.2. Pozos	64
4.3. Sondeos	66
4.4. Aplicaciones a la vigilancia volcánica	67
<b>5. Metodología</b>	<b>69</b>
5.1. Geoquímica	69
5.1.1. Estaciones multiparamétricas	69
5.1.2. Estaciones de $^{222}\text{Rn}$ y $^{220}\text{Rn}$ difuso	71

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

14	<b>ÍNDICE GENERAL</b>
5.1.3. Perfiles . . . . .	72
5.1.4. Gases del suelo, libres y disueltos . . . . .	73
5.2. Sismicidad . . . . .	74
5.3. Deformación del terreno . . . . .	76
<b>6. Resumen</b>	<b>77</b>
6.1. Spatial and temporal analysis of temperature and gaseous emission inside a gallery in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands) . . . . .	78
6.1.1. Contexto geológico . . . . .	78
6.1.2. Resultados . . . . .	79
6.1.3. Discusión y conclusiones . . . . .	90
6.2. Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption . . . . .	95
6.2.1. Contexto geológico . . . . .	95
6.2.2. Red de vigilancia . . . . .	97
6.2.3. Resultados . . . . .	98
6.2.4. Discusión y conclusiones . . . . .	99
6.3. Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands . . . . .	106
6.3.1. Contexto geológico . . . . .	106
6.3.2. Red de vigilancia . . . . .	107
6.3.3. Resultados . . . . .	108
6.3.4. Discusión y conclusiones . . . . .	116
<b>7. Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>8. Trabajos futuros</b>	<b>127</b>
<b>Unidades y acrónimos</b>	<b>131</b>
<b>Glosario</b>	<b>137</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>149</b>
<b>Apéndice</b>	<b>175</b>
<b>A. Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission Inside a Gallery in An Active Volcanic Island (Tenerife, Canary Islands)</b>	<b>175</b>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2916373	Código de verificación: 1MCyi070
Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40

ÍNDICE GENERAL	15
B. Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption	197
C. Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands	211

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

15 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

16 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Índice de figuras

2.1. Localización de las Islas Canarias . . . . .	31
2.2. Anomalías magnéticas de la corteza oceánica en la región de Canarias (imagen cedida por Juan Carlos Carracedo) (a) y progresión de las edades de las Islas Canarias [Guillou et al., 2004, Troll and Carracedo, 2016d] (b). . . . .	32
2.3. Localización de las erupciones históricas en Canarias (rojo) documentadas desde 1585. . . . .	36
3.1. Señales sísmicas observadas en entornos volcánicos: Volcano-Tectónicos (a), Híbridos (b), Largo Periodo (c), Tremor (d) y Explosiones (e). . . . .	40
3.2. Ejemplo de sismómetro de banda ancha (a) y de estación sísmica operativa (b) (CADE en Tenerife perteneciente al IGN). . . . .	41
3.3. Antena de una estación GNSS (a), prismas de referencia situados en la cara norte del Teide (b) y distanciómetro encargado de controlar la distancia a cada uno de ellos desde la estación base (c). . . . .	44
3.4. Esquema general de un sistema volcánico y sus principales emisiones gaseosas. . . . .	45
3.5. Clasificación general de las técnicas de vigilancia geoquímica empleadas en volcanología. . . . .	47
3.6. Toma de muestras de gases fumarólicos y detalle de la ampolla de almacenamiento de la muestra (a), muestreo del gas del suelo (b), toma de muestras de gases disueltos y vista en detalle de las botellas de almacenamiento (c) y ejemplo del muestreo de gases libres mediante el método del embudo invertido (d). . . . .	49

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.7. Medida del flujo difuso de CO<sub>2</sub> de forma discreta (campana) (a). Estación para el registro continuo de la emisión difusa de CO<sub>2</sub> instalada en una área fumarólica (b). Estación Multi-Gas para el registro continuo de la composición de una fumarola (c). Monitor de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (parte superior) y tubo de PVC (parte inferior) de una estación para el registro en continuo de la concentración de ambas especies gaseosas en el suelo (d). Estación multiparamétrica para la medida de la concentración de gases y temperatura en el interior de una galería (e). . . . . 51

3.8. Toma de muestras de agua y medida de los parámetros fisicoquímicos en dos galerías de Tenerife (a) y (b). Sonda multiparamétrica para el seguimiento en continuo de los parámetros fisicoquímicos del agua (c). . . . . 54

4.1. Sistema de transporte por vagonetas (a) y alumbramiento de agua (b) en la galería Vergara, Tenerife. Interior de la galería La Fuente Santa en Fuencaliente, La Palma (c). Vista de la bocamina de la galería Río de Guía en Tenerife (d). . . . . 61

4.2. Localización y traza de las galerías en la isla de Tenerife. . . . . 63

4.3. Vista general del pozo Tigaday, El Hierro. . . . . 65

4.4. Vista interior del sondeo de Montaña Majúa en Tenerife, propiedad del Consejo Insular de Aguas de Tenerife. . . . . 66

5.1. Esquema general de una estación para la medida de las temperaturas y concentración de gases en el interior de una galería. . . . . 70

5.2. Medida de las temperaturas ambiente y del suelo, y de la concentración de CO<sub>2</sub> durante uno de los perfiles llevados a cabo en el interior de la galería RdG en Tenerife. . . . . 72

5.3. Toma de muestras de gas del suelo en el interior de la galería RdG. 73

6.1. Localización y descripción geológica de Tenerife (a). Distribución de galerías en la zona central de Tenerife, líneas azules. Se destacan la galería Río de Guía (RdG) (línea roja) y la estación meteorológica Chavao (triángulo verde) (b). Sección vertical de RdG incluyendo la localización de las cuatro estaciones, la estructura principal de diques identificada por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) y una descripción geológica simplificada (c). En la esquina superior izquierda (c) se muestra una configuración estándar de la estación multiparamétrica. . . . . 78

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

ÍNDICE DE FIGURAS	19
6.2. Perfiles de la temperatura del aire (a), de la temperatura del suelo (b) y de la concentración del CO <sub>2</sub> (c) en el interior de RdG. En cada panel se ha incluido el perfil medio de cada parámetro (curva negra).	80
6.3. Perfiles medios georeferenciados: temperatura del aire (a), del suelo (b) y concentración del dióxido de carbono en aire (c) dentro de la galería RdG.	81
6.4. Media móvil de 24 h de cada parámetro en cada una de las estaciones. Presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre la T <sub>e</sub> y la T <sub>m</sub> (verde) (a). Evolución de la temperatura del aire (b), temperatura del suelo (c), concentración de dióxido de carbono (d) y <sup>222</sup> Rn (e) en cada estación.	82
6.5. Periodo frío, febrero de 2010. Evolución temporal de: presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre T <sub>e</sub> y T <sub>m</sub> (verde) (a), temperaturas del aire (valor T <sub>m</sub> sustraído) (b), temperaturas del suelo (valor T <sub>m</sub> sustraído) (c), concentraciones de dióxido de carbono (d) y <sup>222</sup> Rn (e) en aire.	84
6.6. Periodo cálido, del 1 de agosto de 2010 al 15 de septiembre de 2010. Evolución temporal de: presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre T <sub>e</sub> y T <sub>m</sub> (verde) (a), temperaturas del aire (valor T <sub>m</sub> sustraído) (b), temperaturas del suelo (valor T <sub>m</sub> sustraído) (c), concentraciones de dióxido de carbono (d) y <sup>222</sup> Rn (e) en aire.	86
6.7. Contenido espectral de cada parámetro (c-f) en cada estación durante los periodos frío y cálido. Se han incluido también los parámetros externos: presión atmosférica (a) y temperatura externa (b). Todos los espectros se han representado frente al periodo, T, en horas.	87
6.8. Modelo de la distribución de temperaturas y dinámica del gas (no a escala) para el periodo frío (a) y periodo cálido (b). Se incluyen los perfiles medios de temperatura, dióxido de carbono (línea blanca) y <sup>222</sup> Rn (línea violeta).	92
6.9. Red geoquímica en la isla de El Hierro: estaciones multiparamétricas en galerías (círculos amarillos) y estación de <sup>222</sup> Rn en pozo (círculo magenta). Las estaciones GNSS, HI01 y FRON, se representan con triángulos rojos. Se incluyen las estaciones meteorológicas pertenecientes al AEMET, BALN y AERO (cuadrados azules). Se han destacado las principales estructuras geológicas: deslizamientos gravitacionales (líneas discontinuas de color naranja) y dorsales (líneas discontinuas de color verde).	95

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.10. Esquemas (no a escala) de una estación multiparamétrica para la medida de las temperaturas y concentraciones de gases en el interior de una galería (a) y de la estación para la medida de la concentración de <sup>222</sup>Rn en el pozo (b). . . . . 97

6.11. Evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN (azul) y <sup>222</sup>Rn en RSIM (violeta). El filtrado de ambos registros mediante un filtro Butterworth paso bajo *zero phase* se superpone, en azul oscuro para el CO<sub>2</sub> y rojo para el <sup>222</sup>Rn. También se incluyen la presión atmosférica registrada en la estación AERO (línea gris) así como la temperatura atmosférica medida en la estación BALN (verde). . . . . 99

6.12. Evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN (azul) junto con la misma señal filtrada (línea azul oscuro). También se incluye la evolución de la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la diferencia entre la componente este de esta estación y HI01 (línea verde). Las fases definidas se señalan en la parte superior con las letras A-E. . . . . 100

6.13. Evolución temporal de la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM (violeta) antes del inicio de la erupción junto a la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la energía sísmica liberada acumulada (naranja). La señal filtrada del <sup>222</sup>Rn (rojo) se superpone al registro en RSIM. Los recuadros con márgenes discontinuos resaltan las principales variaciones identificadas en la concentración de <sup>222</sup>Rn. Las fases definidas durante este periodo se indican en la parte superior con las letras A y B. . . . . 102

6.14. Evolución temporal de la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM (violeta) durante el periodo eruptivo junto a la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la energía sísmica liberada acumulada (naranja). La señal filtrada del <sup>222</sup>Rn (rojo) se superpone al registro en RSIM. Las fases definidas durante este periodo se indican en la parte superior con las letras C, D y E. . . . . 103

6.15. Localización de La Palma. Mapa geológico simplificado (a) destacando la Caldera de Taburiente, Cumbre Nueva, Cumbre Vieja, el sistema de fallas de la erupción de San Juan (1949) y las dos últimas erupciones históricas. (b) Red de vigilancia volcánica del IGN junto a dos estaciones meteorológicas pertenecientes al AE-MET, PASO y FUEN. . . . . 106

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

ÍNDICE DE FIGURAS

21

6.16. Datos sísmicos: histograma de eventos desde abril de 2017 a septiembre de 2018 (a) donde los enjambres de octubre de 2017 (azul) y febrero de 2018 (rojo) están resaltados; histograma en detalle de ambos enjambres (b) y (c) incluyendo la energía sísmica acumulada (línea verde); diferencia de tiempos entre las fases P y S para cada evento en cada uno de los enjambres en las estaciones sísmicas más cercanas (d), y la estimación de la  $M_c$  y el Pendiente de la relación entre la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos en la ley de Gutenberg-Richter (valor de b) para cada enjambre (e). . . . . 109

6.17. Relocalización de la sismicidad empleando el programa *hypoDD*. En los paneles (a) y (b) los círculos blancos representan la localización inicial mientras que los círculos azules y rojos marcan la relocalización de las series de octubre de 2017 y febrero de 2018 respectivamente. En el panel (c) se muestra la relocalización conjunta de ambos enjambres. En cada uno de los paneles, esquina inferior derecha, se muestra el error estimado para cada una de las relocalizaciones. . . . . 110

6.18. Registros de QP60 (cuadrados) y QP63 (círculos). De arriba a abajo: (a) relación isotópica del helio corregida,  $(R/R_a)_c$ , (b) estimación de la contribución del helio cortical,  $^4\text{He}_{\text{crist}}$ , (c) relación isotópica del carbono,  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  vs VPDB, (d) concentración de dióxido de carbono y (e) concentración de hidrógeno. Los enjambres de octubre de 2017 y febrero de 2018 se indican con dos barras verticales, una violeta y otra roja respectivamente. . . . . 112

6.19. Relación isotópica del helio,  $R/R_a$ , frente al ratio  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  (a). Se han considerado dos líneas de mezcla distintas debido a las características de cada punto, por lo que ambas parten de dos puntos diferentes: Aire (QP60) y Aire Saturado en Agua, ASA (QP63). También se han establecido dos términos finales del manto (end members) para cada una de estas líneas de mezcla,  $10.04 \pm 0.07$  para QP60 [Padrón et al., 2015] y  $8 \pm 1$  para QP63 [Graham, 2002]. En el panel de la derecha (b) se muestra la concentración de dióxido de carbono frente al  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  vs VPDB. En ambos paneles los cuadrados representan las muestras tomadas en QP60 y los círculos las de QP63. . . . . 113

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

21 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.20. Registros de QP40 (a) y QP41 (b): humedad relativa (a1 y b1), temperatura atmosférica (a2 y b2), presión atmosférica y precipitación acumulada y normalizada (línea negra) (a3) y b3), concentración de <sup>222</sup>Rn en el suelo (a4 y b4), concentración de <sup>220</sup>Rn en el suelo (a5 y b5) y ratio entre <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (a6 y b6). Los valores de temperatura atmosférica y precipitación fueron obtenidos de las estaciones del AEMET PASO para QP40 y FUEN para QP41 (rombos magenta en la Figura 6.15). Todos los registros fueron filtrados con un filtro Butterworth paso bajo *zero phase* y representados sobre los registros originales (líneas verdes). Los periodos de ambos enjambres se han resaltado con dos franjas verticales, una violeta para octubre de 2017 y otra roja para febrero de 2018. . . . . 114

6.21. Registro de las estaciones GNSS entre mediados de abril de 2017 y junio de 2018. Cada panel muestra en cm las componentes diarias norte (violeta), este (azul) y *up*, vertical, (verde). . . . . 115

6.22. Estimación de los desplazamientos de cada componentes en cada una de las estaciones GNSS asumiendo una fuente esférica puntual (modelo de Mogi) localizada a 25 km de profundidad y un volumen de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$ . Los eventos de ambos enjambres también están incluidos, en violeta para octubre de 2017 y en rojo para febrero de 2018. . . . . 116

6.23. Esquemas que muestran la sección vertical este-oeste en Cumbre Vieja describiendo cada una de las fases definidas. Los números 1, 2 y 3 indican los diferentes niveles de almacenamiento del magma identificados por Klügel et al. [2005] . . . . . 119

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

## Índice de tablas

4.1. Número de galerías y pozos por isla [Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2020, Consejo Insular de Aguas de La Palma, 2020, Consejo Insular de Aguas de El Hierro, 2020, Consejo Insular de Aguas de La Gomera, 2020, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, 2020, Consejo Insular de Aguas de Lanzarote, 2020, Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura, 2020] . . . . .	60
5.1. Estaciones multiparamétricas empleadas en la presente Tesis, especificando: parámetros registrados, localización, profundidad y nombre de la galería de cada uno de los emplazamientos. . . . .	71
5.2. Tipos de puntos de muestreo, localización y artículo en el que están presentes. . . . .	74
5.3. Estaciones GNSS empleadas en los artículos incluidos en la presente Tesis especificando su acrónimo, la isla donde están instaladas, la institución a la que pertenecen y el artículo en el que son empleadas. . . . .	76
6.1. Estadísticas descriptivas de los siete perfiles realizados en el interior de la galería RdG. $T_a$ y $T_s$ representan las temperatura ambiente y del suelo, respectivamente, mientras que $[CO_2]$ representa la concentración de dióxido de carbono. . . . .	80
6.2. Resultados de los análisis del gas del suelo. Las concentraciones están expresadas en ppm. . . . .	82
6.3. Coeficientes de correlación entre los parámetros internos y los meteorológicos. . . . .	88
6.4. Ventilación y parámetros de acumulación. . . . .	89

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

24 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

# Capítulo 1

## Introducción

Las erupciones volcánicas suelen estar precedidas por una intensa actividad sísmica, deformación del terreno y una importante emisión gaseosa debida a la liberación de los volátiles disueltos en el magma durante su ascenso. Todas estas manifestaciones registradas en superficie son una muestra de las diferentes y variadas interacciones de los fluidos magmáticos, magma y gases, con la litosfera. Por tanto, un correcto seguimiento de estos parámetros permitiría definir un nivel base de la actividad volcánica, así como identificar cualquier variación que pueda indicar un cambio en dicha actividad. Esto no puede, ni debe, restringirse a una sola técnica y/o parámetro, sino combinar los resultados de todos ellos en una sola interpretación con la que realizar una correcta vigilancia volcánica.

Las Islas Canarias son un archipiélago volcánicamente activo como así ponen de manifiesto las diferentes erupciones registradas durante su periodo histórico, últimos 500 años. Estas erupciones se han concentrado en las islas de Tenerife, Lanzarote, La Palma y El Hierro. El resto, salvo La Gomera, han presentado actividad volcánica durante el Holoceno (últimos 10000 años) y por tanto, según la IAVCEI (*International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*), son consideradas volcánicamente activas. Estos eventos eruptivos han presentado un índice de explosividad bajo, implicando una peligrosidad volcánica moderada, pero el fuerte incremento de la población durante el último siglo ha hecho que el riesgo volcánico haya aumentado exponencialmente.

Con el fin de proveer de agua a la creciente población y abastecer una producción agrícola en constante aumento, a finales del siglo XIX comenzó la perforación de una serie de infraestructuras hidráulicas, pozos y galerías, con las que explotar el agua subterránea de las islas. Estas masas de agua representan en el archipiélago una de sus principales fuentes hídricas, ya que los terrenos volcánicos al ser muy porosos facilitan la formación de acuíferos por percolación del agua

25

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

25 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

25 / 229

26

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

meteórica.

Tanto el gran número de estas infraestructuras ( $\approx 5400$ ) como la longitud total perforada (218 km en pozos solo en Gran Canaria) las convierte en una ventana de observación privilegiada de la geología subterránea de las islas. Además, teniendo en cuenta que los gases magmáticos aprovechan cualquier fisura, fractura y/o terreno poroso que facilite su ascenso a la superficie, los pozos y galerías representan una oportunidad única para el registro y control de las emisiones gaseosas de origen volcánico.

### 1.1. Objetivos

Esta Tesis persigue tres objetivos principales:

- I. Aportar información sobre la emisión gaseosa de origen volcánico a través de las obras de captación de aguas subterráneas.
- II. Poner en valor el uso de estas infraestructuras tanto para presentes como futuras tareas de vigilancia.
- III. Colaborar en la reducción del riesgo volcánico con los resultados de los tres artículos publicados.

Para lograr estos objetivos se han realizado estudios de la emisión gaseosa en tres de las ocho islas que forman parte del archipiélago (Tenerife, El Hierro y La Palma), dentro de lo que se podrían denominar tres niveles de actividad volcánica bien diferenciados: etapa de calma volcánica (Tenerife), evento eruptivo (El Hierro) y periodo de reactivación o *unrest* (La Palma).

En el primer artículo que forma parte de esta Tesis se realizó un estudio de la emisión gaseosa difusa en el interior de la galería Río de Guía (RdG), situada en el flanco oeste de Tenerife. Dicha galería nunca ha alumbrado agua, tiene una longitud de 3 km y se encuentra a una cota de 1800 m.

A lo largo de su traza se realizaron siete perfiles en los que se registraron conjuntamente la temperatura del aire y del suelo así como la concentración de CO<sub>2</sub> cada 200 m en el interior de la galería. Estos perfiles permitieron identificar una anomalía térmica estable situada a unos 2000 m de la bocamina. Alrededor de este punto se registraron las mayores concentraciones de dióxido de carbono

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

26 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 1.1. OBJETIVOS

27

medidas con los perfiles.

Con el fin de caracterizar de una forma más adecuada esta anomalía de temperatura se desplegaron cuatro estaciones de registro continuo, las cuales midieron las temperaturas del aire y del suelo, y las concentraciones de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn. A través del análisis de sus registros se pudieron definir dos periodos con una dinámica muy diferente. Un periodo frío en donde la temperatura exterior era inferior a la media en el interior de la galería, y un periodo cálido donde ocurría lo contrario. Durante este último fue cuando se observó una clara acumulación de gas en el interior de la galería. Se pudo constatar que la anomalía térmica dividía la galería en dos secciones con comportamientos diferentes. Como consecuencia, la evolución de las temperaturas en ambas secciones permitió identificar una pequeña, pero clara, transferencia de calor hacia el frente de la galería durante el periodo frío.

Con respecto al comportamiento de los gases, los registros de las estaciones permitieron confirmar que la principal emisión de dióxido de carbono se situaba entorno a la anomalía térmica. Ese no fue el caso del <sup>222</sup>Rn, el cual pareció ser emitido de forma difusa a lo largo de la galería con un brusco incremento en torno a los 1000 m posiblemente ligado a un cambio en la litología. También, respecto al CO<sub>2</sub>, se pudo confirmar su origen profundo en base a:

- I. Los valores de la relación isotópica del carbono del CO<sub>2</sub> del gas del suelo en el interior de la galería.
- II. Al comprobar que la máxima emisión de dióxido de carbono coincidía con la mayor estructura de diques identificada en el interior de la galería y con la intersección de dos erupciones cercanas.

En el segundo artículo se analizaron los registros de cuatro estaciones geoquímicas para la medida de la concentración de gases, CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn en aire, y las temperaturas del aire y del suelo en galerías, así como el de una estación para el registro de la concentración de <sup>222</sup>Rn en un pozo. Todas ellas fueron desplegadas en El Hierro con la finalidad de monitorizar el proceso de reactivación y posterior erupción submarina que tuvo lugar entre 2011 y 2012. Se identificaron variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en una galería y <sup>222</sup>Rn en un pozo respectivamente, claramente relacionadas con la actividad volcánica previa a la erupción y a la asociada al propio proceso eruptivo.

El Hierro experimentó un despertar volcánico a mediados de julio de 2011. Tras tres meses de intensa actividad sísmica, una deformación del terreno de va-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

27 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

28

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

rios centímetros y la detección de incrementos en la emisión gaseosa, se produjo una erupción submarina al sur de la isla en octubre de 2011 tras cuarenta años de inactividad en el archipiélago.

Se pudo demostrar que los incrementos en la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de una galería durante el periodo pre-eruptivo estuvieron bien correlacionados con la deformación registrada en la isla. Tras el inicio de la erupción se produjo un descenso en la tasa de crecimiento del dióxido de carbono, y las variaciones detectadas durante este periodo parecieron estar relacionadas con una desgasificación de origen profundo.

Respecto al <sup>222</sup>Rn, este presentó dos comportamientos muy diferentes: cambios en el nivel base de emisión y bruscos incrementos durante cortos periodos de tiempo (picos de emisión). Los primeros, durante la etapa pre-eruptiva estuvieron relacionados con cambios en el ratio de deformación sugiriendo una lenta liberación del <sup>222</sup>Rn por estrés de la roca, mientras que durante el periodo eruptivo estuvieron ligados con la desgasificación magmática de origen profundo. En cuanto a los picos de emisión, estos se relacionaron muy bien con bruscos incrementos en la energía sísmica, lo que hace suponer que la microfracturación de la roca permitió la rápida liberación de <sup>222</sup>Rn.

Por último, en el tercer artículo se analizan los datos sismológicos, geodésicos y geoquímicos recabados durante dos periodos de actividad anómala en Cumbre Vieja (La Palma) sin que se produjera erupción. Este tipo de procesos, donde no se produce un evento eruptivo, son conocidos como periodos de reactivación o *unrest*.

En octubre de 2017 y febrero de 2018, se detectaron incrementos en la sismicidad de baja magnitud en La Palma. La primera serie se localizó al oeste de Cumbre Vieja a una profundidad media de 21 km, y la segunda fue localizada prácticamente sobre la dorsal a una profundidad media de 26 km. Esta migración en la sismicidad fue confirmada por la relocalización conjunta de ambos enjambres. Además, ambas series, presentaron un valor de *b* claramente superior a uno, lo que sugiere que los fluidos magmáticos, magma y/o gases, podrían estar tras el origen de esta sismicidad.

Ambos enjambres estuvieron acompañados de incrementos en la concentración de hidrógeno, de la relación isotópica del helio corregida y de la concentración de dióxido de carbono en un pozo muy cercano a la localización de los enjambres. Los aumentos de las dos primeros parámetros tuvieron lugar meses antes de la ocurrencia de la primera serie. También, durante este periodo, y en base al decre-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

28 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

29

mento de la relación isotópica del helio corregida en un sondeo (con los mayores valores registrados en Canarias) se estimó un aporte de helio radiogénico como consecuencia de un aumento del estrés tectónico.

Tras el segundo enjambre se detectó un aumento de la concentración de  $^{220}\text{Rn}$  en el suelo en dos puntos de la dorsal. Esto se relacionó con un aumento del estrés de la roca cerca de Cumbre Vieja y con un posible aumento en la emisión difusa de  $\text{CO}_2$  en la misma zona. Este último aumento sería compatible con el decremento observado en la relación isotópica del carbono en el pozo, que junto con la migración de la sismicidad podría indicar que tanto el magma como la principal emisión gaseosa se desplazaron ligeramente al este.

Por último, y aunque no hubo deformación registrada por la red GNSS, se hizo una estimación del volumen máximo de magma necesario para producir una deformación medible por dicha red. El resultado fue de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$ . La cota inferior del volumen intruido fue estimada en base al momento sísmico de los eventos localizados obteniéndose un valor de  $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$ .

## 1.2. Estructura de la Tesis

Esta Tesis consta de ocho capítulos. En el primero de ellos se detallan los objetivos y la motivación que han impulsado el trabajo. Los siguientes tres capítulos forman una introducción al contexto geodinámico y geológico en el que se han realizado los estudios, el archipiélago canario, al estado del arte de la vigilancia volcánica, desgranando las principales técnicas empleadas, y por último, una aproximación al desconocido mundo de la minería del agua en Canarias.

En el quinto capítulo se explican, paso a paso, las metodologías y técnicas empleadas tanto en la adquisición de los datos como en su análisis. En el siguiente capítulo se agrupan los resúmenes de los tres artículos que forman esta Tesis según estipula la normativa. En el extracto de cada uno de ellos, se hace un resumen del contexto geológico, de los resultados y de la discusión y conclusiones.

El séptimo capítulo contiene las principales conclusiones extraídas de los tres artículos, mientras que en el último se proponen trabajos futuros que ayudarían a incrementar el conocimiento del comportamiento de la emisión gaseosa en las captaciones de aguas subterráneas y su aplicación a la vigilancia volcánica.

Por último, además del glosario, de la sección de unidades y acrónimos y de la bibliografía, el apéndice contiene una copia de la versión publicada de cada

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

29 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

30

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

uno de los artículos y un certificado de publicación emitido por cada editorial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

30 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Capítulo 2

### Marco geodinámico y geológico

Las Islas Canarias, formadas por un grupo de ocho islas volcánicas oceánicas principales y un pequeño conjunto de islotes, están situadas a unos 100 km al oeste de la costa de Marruecos (Figura 2.1). El archipiélago se encuentra situado a una latitud media de 28°N y se extiende unos 500 km de este a oeste cubriendo un área de unos 7490 km<sup>2</sup>. Junto a Azores, Madeira, Cabo Verde y las Islas Salvajes forma la región de la Macaronesia.

Con una población de alrededor de los dos millones de habitantes es una de las comunidades autónomas con mayor densidad poblacional de España, pero debido a la principal fuente de ingresos del archipiélago, el turismo, entre 8 y 14 millones de personas las han visitado anualmente en los últimos 10 años [ISTAC, 2020]. Todo esto implica que sea de especial interés un estudio exhaustivo del volcanismo, así como una correcta vigilancia volcánica que permita minimizar el riesgo volcánico.

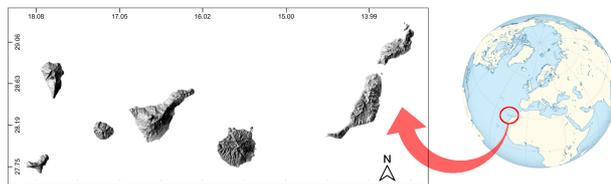


Figura 2.1: Localización de las Islas Canarias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 2.1. Marco geodinámico

Las islas se encuentran en el interior de la placa africana, en su margen continental. Pese a su cercanía al continente africano, todos los datos geofísicos y geoquímicos (xenolitos) sugieren que bajo el archipiélago subyace una corteza oceánica [Bosshard and MacFarlane, 1970, del Olmo and Buitrago, 2002], con un origen estimado entre los 150 y 170 Ma (Jurásico) durante las primeras etapas de apertura del Atlántico Central, ya que casi todo el archipiélago se localiza en una zona de calma magnética, JQZ, [Troll and Carracedo, 2016b]. La primera anomalía de este tipo identificada en las islas se encuentra al oeste de Tenerife (M25, 155 Ma) (Figura 2.2a).

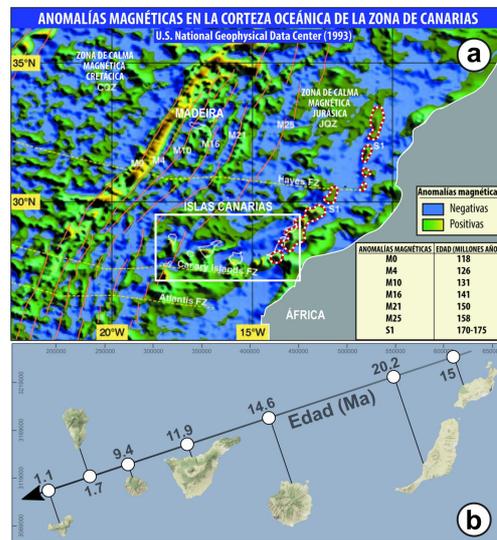


Figura 2.2: Anomalías magnéticas de la corteza oceánica en la región de Canarias (imagen cedida por Juan Carlos Carracedo) (a) y progresión de las edades de las Islas Canarias (Guillou et al., 2004, Troll and Carracedo, 2016d) (b).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

## 2.2. ORIGEN

33

A comienzos del Terciario (hace 60 Ma), la placa africana colisionó con la euro-asiática. La primera de ellas se vio frenada y comenzó un lento giro antihorario generándose un estado de esfuerzos compresivos en la zona donde hoy están presentes las Islas Canarias y la cordillera del Atlas (Marruecos) [Araña et al., 2000]. El volcanismo comenzó en las islas más orientales durante el Cretácico superior, emergiendo entre el Eoceno y Mioceno en las islas más orientales y hace unos 3-4 Ma en las occidentales [Blanco-Montenegro et al., 2008].

La edad de las islas ha sido estimada con ayuda del estudio de los radioisótopos (fundamentalmente K-Ar) y la datación paleomagnética de las rocas emergidas más antiguas. Los resultados ponen de manifiesto un incremento de la edad de oeste a este [Guillou et al., 2004] (Figura 2.2b), siendo Fuerteventura la isla más antigua ( $\approx 20$  Ma), mientras que en el otro extremo se localizan las más jóvenes, La Palma y El Hierro ( $<2$  Ma). Esta progresión de edades también se observa en el solapamiento de las fallas submarinas de las diferentes islas, de modo que cada isla se apoya en la inmediatamente anterior [Urgeles et al., 1998].

## 2.2. Origen

El debate sobre la génesis del archipiélago comenzó en los años 60 del siglo pasado, y aún no hay un acuerdo al respecto en la comunidad científica.

Existen seis hipótesis que intentan explicar el origen de las Islas Canarias. Algunas están basadas en la tectónica, otras en la idea de un punto caliente (similar al caso hawaiano) e incluso se ha propuesto un modelo unificado [Anguita and Hernán, 2000]. A continuación se describen las cuatro principales.

### i) Punto caliente

Postulado con éxito para explicar el volcanismo hawaiano [Wilson, 1963], considera que las Islas Canarias son la representación en superficie de una anomalía mantélica [Carracedo et al., 1998b] que asciende a través de una zona de debilidad cortical [Morgan, 1971].

### ii) Fractura propagante

En esta hipótesis, la apertura de una gran fractura que prolonga la falla sur del Atlas descomprimiría la astenosfera provocando la fusión parcial de esta, y por tanto el volcanismo en Canarias. Una etapa de compresión en el Atlas evitaría el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

33 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

33 / 229

34

## CAPÍTULO 2. MARCO GEODINÁMICO Y GEOLÓGICO

ascenso del magma explicando los periodos de inactividad [Anguita and Hernán, 1975, Robertson and Stillman, 1979].

### iii) Bloques elevados

Se basa en la diferencia del levantamiento entre islas por tectónica compresiva, la cual hace que la corteza oceánica adelgace y la continental engrose. En esta hipótesis cada isla es un bloque delimitado por fallas inversas causadas por la compresión de la dorsal atlántica. La relajación de esfuerzos tectónicos ocasionales podría permitir el ascenso del magma [Araña and Ortiz, 1986, 1991].

### iv) Modelo unificado

Esta hipótesis reúne los aspectos principales de los tres modelos previos. Del punto caliente toma la idea de un manto anómalo (anomalía térmica) bajo las islas; de la fractura propagante, el control tectónico y canalización de los magmas; y de los bloques elevados, la explicación de la posición de las islas [Anguita and Hernán, 2000].

## 2.3. Marco geológico y volcanismo

Los magmas típicamente básicos presentes en las erupciones de Canarias tienen un marcado carácter alcalino y suelen originarse a una profundidad de unos 70 km de profundidad. Aunque el producto principal de estos magmas es el basalto, en las islas de Tenerife y Gran Canaria se han dado las condiciones necesarias para que estos magmas primarios evolucionen al detenerse temporalmente en cámaras magmáticas someras. La evolución geoquímica (diferenciación) que se ha producido en estas cámaras ha generado magmas enriquecidos en gases y productos con un marcado carácter félsico: traquitas y fonolitas.

El volcanismo en las Islas Canarias presenta una gran riqueza de características volcánicas que incluyen tanto enormes flujos de lava como imponentes edificios volcánicos, así como rocas del manto (xenolitos) y grandes deslizamientos del terreno.

### i) Volcanes en escudo

Esta etapa se caracteriza por una actividad claramente efusiva de tipo basáltica, en la que los flujos lávicos alcanzan grandes distancias gracias a su alta temperatura y fluidez. Estas coladas de lava se apilan una sobre otra proporcionando al edificio volcánico la típica forma de escudo. Esta fase es la de mayor

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

34 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 2.3. GEOLOGÍA Y VOLCANISMO

35

duración, tanto submarina como subaérea, en la formación de una isla volcánica oceánica y es precisamente en la que se encuentran La Palma y El Hierro.

#### ii) Estratovolcanes

Este tipo de edificio, típico de zonas de subducción, es poco frecuente en márgenes de placa divergentes como las dorsales oceánicas. En zonas intraplaca, como Canarias, es usual observar volcanes compuestos por varias erupciones donde predominan los materiales basálticos e intermedios. Los estratovolcanes con materiales más evolucionados en regiones intraplaca son menos habituales. En Canarias, la aparente falta de subsidencia y los largos periodos de volcanismo han facilitado la construcción de este tipo de edificios. Claros ejemplos son el Teide en Tenerife y el Roque Nublo en Gran Canaria [Troll and Carracedo, 2016b].

#### iii) Dorsales o rifts

Estas estructuras controlan el desarrollo de muchas islas volcánicas oceánicas, probablemente desde sus etapas iniciales, y generalmente definen la forma final y la topografía del edificio insular. Son edificios poligenéticos (gran número de erupciones) con una morfología similar a la de un tejado a dos aguas y una línea de cumbre muy marcada.

Las dorsales, por lo general, concentran la mayoría de los centros eruptivos por lo que se convierten en importantes zonas donde la peligrosidad volcánica debe ser evaluada. Además juegan un papel fundamental en el desencadenamiento de los deslizamientos gravitacionales. Claros ejemplos de este tipo de estructuras se pueden encontrar en El Hierro, Tenerife y La Palma.

#### iv) Volcanes monogenéticos

También conocidos como conos de cinder, son estructuras simples con forma de cono truncado de composición principalmente basáltica y formadas por piroclastos y algunas coladas. En Canarias son la manifestación volcánica más habitual. Estos edificios son el resultado de erupciones monogenéticas, de semanas a meses de duración, y en las islas están normalmente localizados en las dorsales.

#### v) Deslizamientos gravitacionales

Estos procesos que implican la movilización de ingentes cantidades de material en un corto espacio de tiempo, pueden tener lugar durante episodios de intensa actividad volcánica o en fases erosivas. Se han identificado al menos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

35 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

una docena de ellos en las islas, siendo más fácilmente observables en las islas occidentales (más jóvenes) como El Hierro con tres grandes deslizamientos identificados [Becerril et al., 2016] o Tenerife [Troll and Carracedo, 2016e] donde se ha observado uno de los mayores de Canarias.

#### vi) Calderas

En el archipiélago, la mayoría de las calderas se han originado por la combinación de un deslizamiento gravitacional y el subsiguiente proceso de erosión. En este grupo encontramos a la Caldera de Taburiente en La Palma [Troll and Carracedo, 2016c] y Las Cañadas del Teide en Tenerife [Troll and Carracedo, 2016e]. Un caso excepcional es la Caldera de Tejeda en Gran Canaria, originada por un colapso vertical durante la emisión voluminosa de ignimbritas [Troll and Schmincke, 2002].

### 2.4. Volcanismo histórico

Todas las islas del archipiélago canario están consideradas activas a excepción de La Gomera, puesto que han alojado erupciones durante el Holoceno (últimos 10000 años) (Figura 2.3). De las ocho islas, solo Lanzarote, Tenerife, La Palma y El Hierro han presentado erupciones durante el periodo histórico (últimos 500 años). La última erupción (2011-12) tuvo lugar en El Hierro, que además fue la primera erupción submarina documentada en Canarias (Figura 2.3).

Las erupciones históricas han sido principalmente de composición basáltica, con coladas de lava como producto principal, y de explosividad baja a moderada (estromboliana a estromboliana violenta) [Romero Ruiz, 1989].

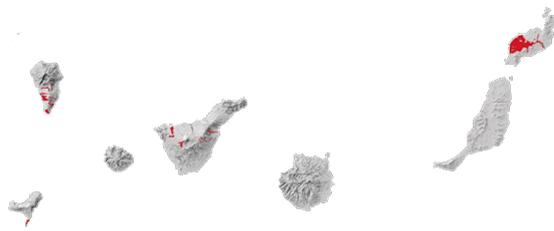


Figura 2.3: Localización de las erupciones históricas en Canarias (rojo) documentadas desde 1585.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

#### 2.4. VOLCANISMO HISTÓRICO

37

##### i) Lanzarote

Ha experimentado dos erupciones durante el periodo histórico [Romero Ruiz, 1989]. La de Timanfaya (1730-36) ha sido el mayor y más largo evento eruptivo acontecido en el archipiélago. Se ha estimado una emisión de 3 a 5 km<sup>3</sup> de material a través de unos 30 conos alineados a lo largo de 14 km en dirección noreste-suroeste [Troll and Carracedo, 2016d]. Muchos habitantes emigraron a otras islas y fue la primera vez en la historia de Canarias en la que se formó una comisión para el seguimiento de una crisis volcánica. La última erupción en Lanzarote tuvo lugar en 1824 y fue precedida de 11 años de actividad sísmica sentida.

##### ii) La Palma

Con seis erupciones bien documentadas es la isla más activa en tiempos históricos, todas ellas localizadas a lo largo de la dorsal de Cumbre Vieja [Romero Ruiz, 1989]. La erupción de San Juan (1949), con tres centros eruptivos actuando aislada y simultáneamente, alternó actividad freatomagmática y efusiva emitiendo diferentes tipos de magmas, fue una erupción muy compleja [Rubio, 1950, Klügel et al., 1999]. La erupción del Teneguía (1971) fue la última del siglo XX en Canarias, y la única de la isla con una víctima mortal debido a la inhalación de gases. Fue una típica erupción estromboliana con una pequeña columna eruptiva además de fuentes y coladas de lava. Esta fue la primera erupción de Canarias de la que se obtuvieron registros instrumentales (sismicidad) [Araña and Fuster, 1974].

##### iii) El Hierro

Recientes estudios [Villasante-Marcos and Pavón-Carrasco, 2014] sitúan a la erupción de Lomo Negro entre los 115 BCE y 1602 CE. Por otro lado, la crisis sísmica acontecida en 1793 CE podría estar relacionada con una intrusión magmática o incluso un evento eruptivo submarino [Villasante-Marcos and Pavón-Carrasco, 2014]. En cualquier caso, en su registro histórico solo hay una erupción documentada, la última acontecida en el archipiélago (2011-12) [López et al., 2012]. Fue la primera erupción de las islas completamente monitorizada desde la fase de reactivación y además, la única submarina registrada históricamente, aunque si atendemos a las batimetrías realizadas en las islas es obvio que este tipo de eventos debe ser muy frecuente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

37 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

37 / 229

38

CAPÍTULO 2. MARCO GEODINÁMICO Y GEOLÓGICO

iv) Tenerife

En esta isla coexisten dos tipos de volcanismo:

- I. Monogenético: el cual se encuentra localizado principalmente en las dorsales noreste y noroeste, muestra una composición basáltica y erupciones de tipo estromboliana [Romero Ruiz, 1989]. Destacan por su impacto social la erupción de Siete Fuentes - Fasnía - Arafo (1705-06) con 16 víctimas [Romero Ruiz, 1989], y la de Garachico (1706) cuyas lavas destruyeron el puerto más importante de la isla en aquella época [Romero Ruiz, 1989].
- II. Poligenético: está asociado al complejo volcánico central, el sistema Teide-Pico Viejo, con erupciones donde han intervenido magmas altamente evolucionados [Carracedo and Troll, 2013]. El complejo Teide-Pico Viejo, único sistema volcánico de Canarias con cámara magmática activa [Carracedo and Troll, 2013], no ha presentado eventos durante el registro histórico. El último evento eruptivo que puede considerarse completamente perteneciente al sistema central fue la erupción efusiva de Lavas Negras ocurrida hace 1150 años con su centro eruptivo situado en el propio edificio Teide [Carracedo and Troll, 2013].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

38 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Capítulo 3

### Vigilancia volcánica

Las erupciones volcánicas han causado menos víctimas y menores pérdidas económicas que otros fenómenos naturales como inundaciones, terremotos y huracanes. Sin embargo, el importante aumento de la población durante el siglo pasado en zonas volcánicamente activas ha hecho que la exposición al peligro volcánico, es decir el riesgo volcánico, haya aumentado exponencialmente [Sparks, 2003]. Un buen ejemplo de esta situación son las Islas Canarias, en las cuales la población ha pasado de medio millón a los dos millones de habitantes en los últimos cien años.

Debido al incremento exponencial del riesgo volcánico, la vigilancia volcánica se ha convertido en una herramienta fundamental con la que poder mitigarlo en gran medida. Esta monitorización no puede, ni debe, realizarse empleando una sola técnica de vigilancia puesto que las manifestaciones de la actividad volcánica son diversas, siendo cada una de ellas una muestra parcial de la interacción de los fluidos volcánicos con la litosfera [Sparks, 2003].

Las principales técnicas de vigilancia son: sismología, geodesia (control de la deformación del terreno), monitorización de la emisión de gaseosa y geología. Además de estas, existe un conjunto de técnicas que las complementan.

#### 3.1. Sismología

La sismicidad es uno de los principales signos de actividad volcánica, manifestándose tanto en periodos de calma como pre-eruptivos (o *unrest*), eruptivos y pos-eruptivos [Sparks, 2003, Zobin, 2012].

39

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

39 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

39 / 229

La sismicidad volcánica es muy diferente a la tectónica, principalmente debido al tipo de señales registradas. Si bien es normal detectar eventos volcano-tectónicos en ambientes volcánicos, también es habitual observar otro tipo de señales con diferente composición frecuencial y distinta fuente u origen [Zobin, 2012] (Figura 3.1). Todas estas señales son reflejo de la compleja interacción de los fluidos magmáticos (magma y gases) con la roca encajante.

Las típicas señales registradas en ambientes volcánicos se pueden clasificar en los siguientes tipos [Zobin, 2012]:

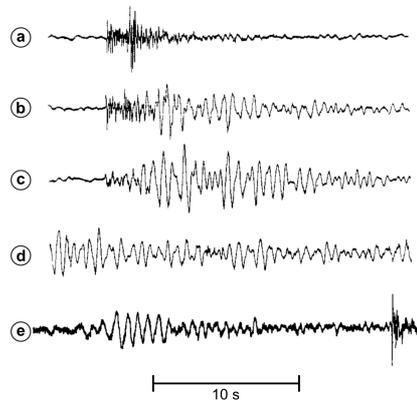


Figura 3.1: Señales sísmicas observadas en entornos volcánicos: Volcano-Tectónicos (a), Híbridos (b), Largo Periodo (c), Tremor (d) y Explosiones (e).

- I. Terremotos Volcano-Tectónicos (VT): de corta duración (segundos), magnitud moderada ( $<6$ ), con llegadas claras de fases P y/o S, y normalmente se producen en forma de enjambres de pequeños terremotos. Su origen está relacionado con la rotura de la roca por cizallamiento como respuesta al esfuerzo producido por los fluidos volcánicos y/o tectónico.
- II. Largo Periodo (LP): de corta duración (segundos-minutos) y con un contenido frecuencial inferior a los VT. No presentan llegadas de fases P ni

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.1. SISMOLOGÍA

41

S por lo que son difíciles de localizar. Su origen se ha relacionado con la reverberación de fluidos volcánicos en conductos cerrados.

- III. Eventos Híbridos (HB): combinación de un VT, por lo general al inicio, y un LP. Su fuente se ha relacionado con la generación de una fractura (VT) que a continuación es rellenada por fluidos que la hacen resonar (LP).
- IV. Tremor (TR): señal continua de cierta intensidad, sin la presencia de fases P ni S, con una duración entre minutos y meses. Generalmente presenta un contenido frecuencial bajo, 1-10 Hz. Esta señal está asociada con movimiento de magma cerca de la superficie.
- V. Explosiones (EX): se manifiestan durante el periodo eruptivo con un aumento brusco de la señal y un contenido frecuencial alto. Suelen distinguirse primero las ondas internas (sísmicas) y a continuación la onda de choque (acústica).



Figura 3.2: Ejemplo de sismómetro de banda ancha (a) y de estación sísmica operativa (b) (CADE en Tenerife perteneciente al IGN).

Para la detección de las señales sísmicas se emplean sismómetros y acelerómetros. Estos equipos registran y digitalizan las vibraciones del suelo para su posterior estudio. Según el rango de frecuencias, los sismómetros se clasifican en sensores de corto periodo (1-100 Hz) y de banda ancha (0.01-100 Hz) (Figura 3.2a). También se distinguen entre sensores pasivos, sin alimentación eléctrica, y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

41 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

activos, requieren de alimentación. Los acelerómetros, en cambio, están diseñados, como su propio nombre indica, para el registro de aceleraciones, típicamente entre 1 y 2 g [Havskov and Alguacil, 2004].

En el estudio y análisis de la actividad volcánica, la metodología más empleada se basa en desplegar sismómetros alrededor de la zona de interés en forma de red sísmica, conformando cada elemento de esta red una estación (Figura 3.2b) [Havskov and Alguacil, 2004]. Combinando los registros de un mismo evento en cada elemento de una red sísmica es posible localizarlo mediante el picado de las fases sísmicas. En el caso de los eventos VT asociados con movimientos de magma, estos suelen presentar formas de onda similares con lo que se facilita un análisis automático mediante técnicas de correlación [Zobin, 2012].

En la sismología volcánica también suelen emplearse *arrays* o antenas sísmicas con el fin de estudiar las señales que no presentan llegadas de fases P y/o S (LP y TR principalmente). Estas antenas sísmicas son redes de sismómetros separados entre decenas y centenares de metros, desplegados en una pequeña área de material homogéneo. Esta configuración permite determinar la dirección de llegada de cualquier señal sísmica mediante la correlación de las formas de onda aprovechando el desfase de la señal recibida entre sismómetros [Almendros González et al., 2002].

El correcto análisis de la actividad sísmica que precede y acompaña las erupciones volcánicas es de suma importancia, y en concreto la evaluación de los cambios temporales de la misma. Estos suelen desarrollarse de manera paralela a los cambios en la evolución de la actividad volcánica [Sparks, 2003, Zobin, 2012, López et al., 2012]. Aunque no todos los volcanes presentan el mismo tipo de sismicidad, hay patrones en la actividad sísmica que son comunes en la mayoría de ellos [Zobin, 2012]: migración de epicentros, incremento de la actividad en número y magnitud, aparición de eventos híbridos (HB), de largo periodo (LP) y señales de tremor (TR), etc.

### 3.2. Geodesia

Las erupciones volcánicas, y sobre todo en los periodos previos o de *unrest*, suelen estar acompañados de una deformación del terreno cuantificable, la cual puede estar comprendida entre centímetros y metros [Dzurisin, 2006, López et al., 2012]. Esta deformación es producida por la presión que ejercen los fluidos magmáticos, magma y/o gases, en la litosfera en su intento por alcanzar la superficie.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 3.2. GEODESIA

43

Dentro de las técnicas geodésicas mayormente empleadas en la vigilancia volcánica podemos destacar, por su amplio uso, las siguientes [Dzurisin, 2006]:

- I. GNSS (*Global Navigation Satellite System*), técnica de posicionamiento satélite empleada para el control de la posición relativa entre estaciones desplegadas en el área de interés. Los equipos, instalados con una monumentación estable, trabajan con doble frecuencia y antenas de alta sensibilidad con el fin de incrementar la precisión (Figura 3.3a). A partir de registros de larga duración, y con el correcto pos-procesado de los datos es posible alcanzar precisiones de milímetros.
- II. Inclinómetros, son equipos con los que se registra la inclinación de un plano respecto a la horizontal. En la vigilancia volcánica se emplean equipos con resoluciones de micro o nano radianes desplegados alrededor de la zona de estudio, convenientemente aislados de los efectos meteorológicos a los cuales son muy sensibles.
- III. InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), se emplean imágenes captadas por satélites con las que se estima la deformación del terreno mediante el estudio del patrón de interferencias de fase (interferogramas) entre al menos dos imágenes. Es una herramienta complementaria a inclinómetros y estaciones GNSS puesto que estos detectan deformaciones puntuales con precisiones altas, mientras que el InSAR lo hace sobre amplias zonas con precisiones más bajas.
- IV. Nivelación de alta precisión, consiste en medir diferencias de altitud entre dos puntos separados unos pocos metros por medio de la diferencia de lecturas directas hechas sobre dos reglas graduadas (miras) situadas entre ellos. Las lecturas se realizan con un instrumento perfectamente horizontal situado en el punto medio. Con este método es posible alcanzar precisiones de decenas de milímetros.
- V. Distanciómetros, equipos especialmente diseñados para la medición de distancias entre la estación base y un punto de referencia (prisma) mediante el rebote en este último de un haz infrarrojo o láser (Figura 3.3c). En la vigilancia volcánica se emplean varios puntos de referencia situados en la zona donde se espera detectar algún tipo de deformación como puede ser una ladera, un cono, un flanco de un estratovolcán (Figura 3.3b), etc.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

43 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

VI. Mareógrafos, equipos encargados de registrar las mareas que suelen emplearse en áreas volcánicas cercanas al mar o lagos para detectar algún tipo de elevación o subsidencia del terreno.

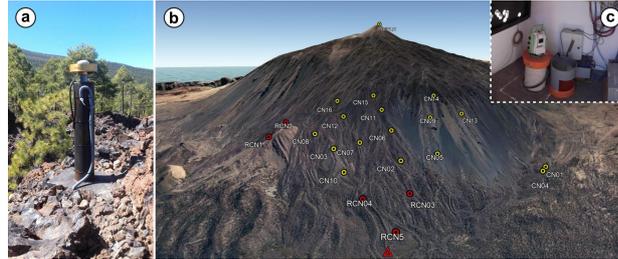


Figura 3.3: Antena de una estación GNSS (a), prismas de referencia situados en la cara norte del Teide (b) y distanciómetro encargado de controlar la distancia a cada uno de ellos desde la estación base (c).

Todas estas técnicas geodésicas tienen como objetivo estimar la deformación del terreno y proporcionar un resultado en unidades de longitud o de inclinación [Dzurisin, 2006]. Pero además de esto, y partiendo de los mismos datos, es posible estimar la profundidad y volumen de magma responsable de la deformación observada en superficie [Dzurisin, 2006]. Para ello es necesario aplicar métodos de inversión y modelos matemáticos en los que se tiene en cuenta la estructura interna y sus parámetros elásticos. Un buen ejemplo de este tipo de modelos es el de Mogi [Mogi, 1958, Meletlidis et al., 2015], en donde la fuente de deformación se simula como una esfera. En algunos casos es posible incluso inferir la forma del volumen [Dzurisin, 2006].

### 3.3. Geoquímica

El magma es un fundido silicatado en el que se encuentra disuelto un gran número de especies volátiles [Sigurdsson et al., 2015]. Una disminución en la presión litostática causada por la fracturación de la roca encajante, el ascenso de un reservorio magmático o la realimentación de uno previo son por lo general las principales causas que propician la exsolución de los volátiles disueltos [Inguaggiato et al., 2018]. La descarga de estos fluidos magmáticos en superficie

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.3. GEOQUÍMICA

45

es una manifestación directa de la desgasificación magmática en profundidad, lo cual proporciona una información muy valiosa del estado de actividad volcánica [Inguaggiato et al., 2018] (Figura 3.4). Esta emisión gaseosa se produce tanto en periodos eruptivos como en tiempos de calma.

La emisión gaseosa en un área volcánica está compuesta típicamente por especies gaseosas condensables ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $HF$  y  $HCl$ ) y no condensables ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $Ar$  y  $He$  entre otros) [Inguaggiato et al., 2018]. La composición química de esta emisión gaseosa y sus ratios relativos proporcionan información acerca de las condiciones de presión y temperatura [Chiodini et al., 1998, Giammanco et al., 2007, Aiuppa et al., 2007, Paonita et al., 2012, Melián et al., 2012, Hernández et al., 2017], mientras que las relaciones isotópicas de elementos estables ( $He$ ,  $C$ ,  $Ar$ ,  $N$  y  $O$ ) permiten estimar las características de los procesos fisicoquímicos que tuvieron lugar durante la desgasificación y migración de los gases a la superficie [Inguaggiato et al., 2004, Capasso et al., 2005, Chiodini et al., 2008, Melián et al., 2012, Padrón et al., 2013, Padilla et al., 2013]. Es importante indicar que tanto la composición como los ratios que caracterizan la emisión, así como las especies gaseosas presentes dependen del ambiente volcánico ya que están estrechamente ligados al tipo de magma [Sigurdsson et al., 2015].

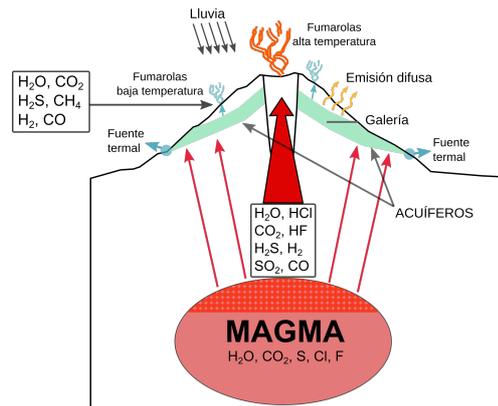


Figura 3.4: Esquema general de un sistema volcánico y sus principales emisiones gaseosas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

45 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

La emisión gaseosa se manifiesta principalmente de dos formas:

- I. Emisión local, la cual está concentrada en una zona muy restringida y concreta del sistema volcánico llegando en muchas ocasiones a ser visible [Giggenbach, 1975, Albert-Beltrán et al., 1990, Aiuppa et al., 2009, Melián et al., 2012] (Figura 3.4). El ejemplo más claro de este tipo de emisión son las fumarolas, aunque en ella también se deben incluir las plumas y columnas eruptivas.
- II. Emisión difusa, en este caso la emisión de gas se produce a lo largo de todo el sistema volcánico de forma no visible [Chiodini et al., 1998, Hernández et al., 2000, Chiodini et al., 2008, Hernández et al., 2017](Figura 3.4).

Es posible describir cuatro pasos clave con los que definir un buen procedimiento en la caracterización de un sistema volcánico desde el punto de vista geoquímico [Inguaggiato et al., 2018]:

- I. Identificar los principales fluidos implicados en el sistema, haciendo hincapié en las especies magmáticas e hidrotermales.
- II. Caracterizar la composición química e isotópica y el grado de mezcla.
- III. Identificar los tipos y el grado de interacción entre el gas, el agua y la roca.
- IV. Formular un modelo geoquímico.

La vigilancia volcánica, desde el punto de vista geoquímico, tiene por objetivo principal identificar variaciones en la emisión gaseosa relacionados con cambios en la actividad volcánica [Chiodini et al., 2008, Melián et al., 2012, Paonita et al., 2012, Padrón et al., 2013, Padilla et al., 2013, Inguaggiato et al., 2018]. Como se ha indicado, mientras el magma asciende y/o antiguos reservorios son realimentados, los compuestos volátiles disueltos en el magma son liberados de acuerdo a sus solubilidades. Durante el ascenso de estos fluidos es habitual que se produzcan interacciones con la litosfera, con acuíferos y aguas superficiales antes de ser emitidos a lo largo de las principales estructuras volcano-tectónicas. Por tanto, y debido a la gran variedad de especies gaseosas y a las diferentes interacciones, las técnicas y metodologías empleadas en la monitorización de la emisión gaseosa son muy variadas [Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018].

Como clasificación general con la que seguir la descripción de las diferentes metodologías y técnicas generalmente empleadas en la vigilancia volcánica

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.3. GEOQUÍMICA

geoquímica, se propone una división en dos grandes grupos: directas y remotas (Figura 3.5). Las técnicas directas son todas aquellas que se despliegan sobre el terreno, en el área volcánica, en contacto directo con la zona de emisión. En cambio, las remotas, son todas aquellas metodologías que permiten la monitorización de la emisión gaseosa a distancia. Por su naturaleza, existen ciertas aplicaciones que pueden ser empleadas tanto en el ámbito directo como remoto.

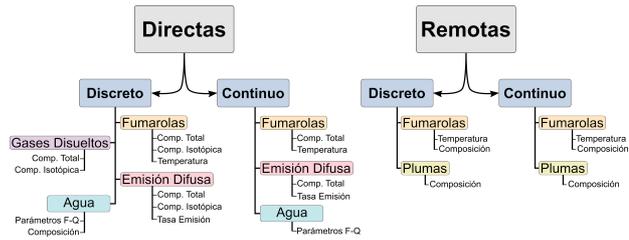


Figura 3.5: Clasificación general de las técnicas de vigilancia geoquímica empleadas en volcanología.

Las fumarolas son la principal y más clara fuente de emisión gaseosa en un sistema volcánico [Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018]. Son emisiones visibles compuestas en su mayoría por vapor de agua y suelen estar localizadas en cráteres de volcanes activos. También se deben incluir dentro de las principales zonas de emisión las anomalías térmicas, presentes en muchos edificios volcánicos, donde los gases ácidos calientan y alteran la roca aunque la emisión no sea completamente visible. Ambas estructuras de emisión son una ventana directa de la desgasificación magmática, puesto que indican la salida de caminos preferenciales para el ascenso de los gases magmáticos sin apenas interacción con el medio [Albert-Beltrán et al., 1990, Melián et al., 2012, Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018].

Las técnicas más habituales con las que monitorizar fumarolas y anomalías térmicas son las siguientes:

- I. Muestreo discreto. Con la mayor periodicidad posible es aconsejable la toma de muestras de gas fumarólico. Si son fumarolas de alta temperatura se debe seguir el método propuesto por Giggenbach [Giggenbach, 1975]. En este, una piqueta hueca de acero es clavada en el suelo ( $\approx 40$  cm) y mediante un sistema de tubos de silicona conectados a él, se captura el gas en una ampolla parcialmente rellena con una disolución NaOH 4M y donde

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

previamente se ha practicado el vacío. De esta forma se separan los gases condensables (capturados en la disolución NaOH) de los no condensables para su posterior análisis. Para el caso del análisis isotópico del He y C se deben tomar dos ampollas de doble vía adicionales (Figura 3.6a).

Los análisis de la composición de la fase gaseosa se realizan mediante cromatógrafos de gases, mientras que para la determinación de las relaciones isotópicas del He y C se emplean espectrómetros de masas de tipo cuadrupolar especialmente diseñados. La fase líquida, donde quedan capturados los gases condensables, es analizada por cromatografía iónica.

La temperatura también es un parámetro importante que describe el estado de las fumarolas. Cuando no es posible su registro en continuo, al menos se recomienda disponer de los valores de temperatura de forma discreta con ayuda de un termómetro o termopar, y en el caso de disponer de cámaras térmicas se pueden cubrir grandes áreas [Spampinato et al., 2011].

- II. Seguimiento en continuo. Con ayuda de estaciones Multi-Gas (*Multi-component Gas Analyser System*) (Figura 3.7c) es posible obtener un registro continuo de los principales componentes gaseosos de una zona fumarólica [Aiuppa et al., 2005, 2009]. Emplean sensores electroquímicos con los que registrar las concentraciones de SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> y CO entre otros, junto con sensores NDIR (*Non Dispersive InfraRed*) para la determinación de la concentración de CO<sub>2</sub>.

La temperatura de las fumarolas y zonas con anomalías térmicas suele controlarse con ayuda de termómetros de registro continuo [Madonia et al., 2013], pero si la zona es amplia también es posible usar cámaras termográficas situadas en localizaciones fijas a pocas decenas de metros con las que obtener imágenes en continuo y estimar la temperatura aparente en la superficie de fumarolas y zonas con anomalías térmicas [Spampinato et al., 2011].

- III. Medida discreta remota. Existen campos fumarólicos a los que es prácticamente imposible acceder y desplegar instrumentación. En estos casos es posible emplear cámaras térmicas con las que estimar su temperatura y también estaciones Multi-Gas con las que conocer, aunque sea periódicamente, la evolución de la temperatura y concentración de sus principales gases.

- IV. Monitorización remota en continuo. Cuando no es posible instalar una cámara térmica o Multi-Gas en las inmediaciones de la zona fumarólica, ambas técnicas, gracias a su metodología de medida, son fácilmente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.3. GEOQUÍMICA

49

desplegables a distancia y así se puede obtener un registro tanto de la temperatura como de la composición gaseosa.



Figura 3.6: Toma de muestras de gases fumarólicos y detalle de la ampolla de almacenamiento de la muestra (a), muestreo del gas del suelo (b), toma de muestras de gases disueltos y vista en detalle de las botellas de almacenamiento (c) y ejemplo del muestreo de gases libres mediante el método del embudo invertido (d).

La emisión gaseosa en un sistema volcánico en forma difusa se produce a lo largo de todo el sistema volcánico [Chioldini et al., 1998, Hernández et al., 2000, Pecoraino et al., 2005, Pérez et al., 2012, Melián et al., 2014]. Esto es debido a que los gases durante su ascenso aprovechan todo tipo de fracturas, fisuras y terrenos porosos con los que alcanzar la superficie [Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018]. Al igual que en el caso fumarólico, las técnicas y metodologías son variadas. Las principales son:

- I. Control discreto. Se suelen tomar muestras de gas del suelo clavando una pica de acero a unos 40 cm de profundidad y luego, con ayuda de una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

49 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

jeringa, extraer el gas y almacenarlo en viales (Figura 3.6b). El número de muestras dependerá de la extensión del área a estudiar. También es recomendable tomar muestras en ampollas para su posterior análisis isotópico al igual que en el caso de las fumarolas. Los análisis de estas muestras se realizan de la misma forma que con las fumarolas: cromatógrafos de gases y espectrómetros de masas.

En los últimos años se ha puesto mucha atención en el control de la emisión difusa de CO<sub>2</sub> aplicando el método de la cámara de acumulación [Chiodini et al., 1998] (Figura 3.6a). Esta técnica consiste en depositar sobre la superficie del suelo una cámara cilíndrica abierta por un extremo que permite la acumulación del gas emitido a través del terreno. El gas acumulado es bombeado a través de un circuito cerrado hacia un espectrómetro de CO<sub>2</sub>, tras el cual el gas regresa a la cámara de acumulación. De esta forma se obtiene una curva de acumulación del gas dentro de la cámara, concentración vs tiempo. El valor de la pendiente en el tramo lineal de esta curva de acumulación es proporcional al valor del flujo de CO<sub>2</sub> emitido [Chiodini et al., 1998]. Esta metodología permite estimar el flujo difuso del dióxido de carbono de manera casi instantánea en un punto, lo que facilita la realización de campañas de medida con el mayor número de medidas/puntos posibles [Chiodini et al., 1998, Pecoraino et al., 2005, Melián et al., 2014].

Por último, también es importante mencionar uno de los primeros sistemas desarrollados para la estimación de la emisión difusa, las trampas alcalinas [Taran et al., 2001]. Se componen de un pequeño recipiente con una disolución alcalina (NaOH) que suele situarse sobre las laderas del volcán. De esta forma se estiman las tasas de emisión de las especies gaseosas emitidas por el sistema volcánico a partir de las absorbidas por la disolución. Otra posibilidad consiste en enterrar la trampa, de esta forma podemos estudiar los gases que se difunden a través del suelo. Periódicamente se recogen las trampas y se analizan en el laboratorio.

- II. Seguimiento en continuo. Mediante el empleo de sensores y de instrumentación especialmente diseñada para ello, es posible monitorizar la emisión difusa de diversas especies gaseosas de origen volcánico. Los más extendidos son la medida en continuo del flujo difuso de CO<sub>2</sub> mediante una estación automatizada basada en el método de la cámara de acumulación [Padrón et al., 2008, Pérez et al., 2012, Inguaggiato et al., 2012] (Figura 3.7b) y, el registro en continuo de la concentración de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn en suelos (Figura 3.7d) [Pérez et al., 2007, Giammanco et al., 2007, Neri et al., 2016]. En esta última, un monitor de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (parte superior en la Figura 3.7d) es conectado a un tubo de PVC enterrado verticalmente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilár  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

3.3. GEOQUÍMICA

51

mediante un circuito cerrado de tubos de silicona (parte inferior en la Figura 3.7d) registrándose de esta forma la concentración de ambas especies en el volumen cerrado.

En Canarias, como se ha comentado previamente, existe una red de infraestructuras para el aprovechamiento de las aguas subterráneas (galerías, pozos y sondeos) que permite monitorizar esta emisión difusa [Martín-Luis et al., 2002, Soler et al., 2004, Pérez et al., 2007, Martín-Luis et al., 2015]. En la Figura 3.7e se muestra una estación para la medida de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn, además de las temperaturas de aire y del suelo, en el interior de una galería en la isla de Tenerife.

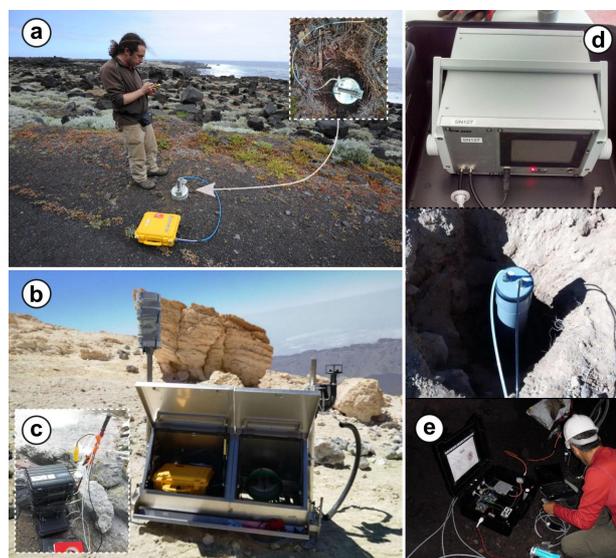


Figura 3.7: Medida del flujo difuso de CO<sub>2</sub> de forma discreta (campaña) (a). Estación para el registro continuo de la emisión difusa de CO<sub>2</sub> instalada en una área fumarólica (b). Estación Multi-Gas para el registro continuo de la composición de una fumarola (c). Monitor de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (parte superior) y tubo de PVC (parte inferior) de una estación para el registro en continuo de la concentración de ambas especies gaseosas en el suelo (d). Estación multiparamétrica para la medida de la concentración de gases y temperatura en el interior de una galería (e).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

51 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

En su ascenso a la superficie, los gases magmáticos interaccionan con el medio, roca y agua, cambiando sus propiedades [Brusca et al., 2001, Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018]. Por lo general, los sistemas volcánicos son muy porosos debido a la presencia de innumerables fracturas y fisuras, coladas de lava y depósitos de piroclastos. Estas estructuras favorecen la captación de la precipitación y formación de acuíferos. Los gases magmáticos igualmente pueden alterar aguas superficiales como es el caso de lagos y ríos.

Las masas de agua presentes en regiones volcánicas no son inmunes ante los gases de origen profundo. De hecho, la interacción de estos con el agua implican cambios fisicoquímicos que permiten seguir el estado de actividad. Por lo general, y debido a que el dióxido de carbono es uno de los principales gases que componen la emisión gaseosa de origen volcánico, la interacción de grandes cantidades de este gas con el agua hace que esta última se acidifique [Brusca et al., 2001, Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018]. Además, debido a que los gases magmáticos son liberados a altas temperaturas, la temperatura del agua se ve incrementada, lo que unido al proceso de acidificación ya comentado, produce una erosión más efectiva de la roca. Como resultado, el agua se ve enriquecida en minerales haciendo que, por lo general, los valores de la conductividad eléctrica sean altos. [Brusca et al., 2001, Sigurdsson et al., 2015, Inguaggiato et al., 2018].

Dentro de las principales técnicas y metodologías empleadas en el seguimiento de las masas de agua destacan las siguientes:

- I. Muestreo discreto. Con un simple multímetro es posible medir los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura y conductividad eléctrica entre otros) del agua (Figura 3.8a) [Brusca et al., 2001, Armienta et al., 2014]. Por lo general, estas suelen presentar valores ácidos de pH y conductividades altas en áreas volcánicas. Conviene determinar también en el campo la alcalinidad de las muestras, la cual está directamente relacionada con la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en las mismas.

Mediante la toma de muestras de agua se pueden realizar análisis con los que determinar el contenido de los componentes mayoritarios (sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, nitratos, fosfatos, etc) y traza (metales principalmente) presentes en el agua, los cuales indican qué materiales ha atravesado el agua así como posibles variaciones relacionadas con la actividad volcánica [Capasso et al., 2001, Brusca et al., 2001] (Figuras 3.8a y b). Las técnicas de análisis en el laboratorio de los distintos elementos son muy variadas. Algunos ejemplos son: cromatografía iónica para aniones, espectrometría de absorción atómica para cationes, ICP-MS para elementos traza y volumetría para el caso de la alcalinidad.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 3.3. GEOQUÍMICA

53

También es importante determinar la composición total del gas y las relaciones isotópicas de algunos elementos [Capasso et al., 2001, Marrero et al., 2008, Capasso et al., 2005, Marrero-Díaz et al., 2015]. Estos resultados deben ser combinados con los parámetros fisicoquímicos y el análisis de los elementos mayoritarios y traza para una correcta interpretación. En la toma de la muestra y el posterior análisis de los gases disueltos se suele seguir el método descrito por Capasso e Inguaggiato [1998] que está basado en el equilibrio de presiones parciales de los gases en la fase líquida y gaseosa. Se llena una botella de vidrio completamente, con cuidado de no dejar burbujas de aire en su interior, cerrándola a continuación con una tapa de poliuretano que evita la pérdida de gas (Figura 3.6). Ya en el laboratorio, se extrae el gas para analizar su composición total e isotópica con los mismos equipos que se emplean para los gases fumarólicos.

Por último, es posible estimar la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  disuelto en el agua [D'Alessandro and Vita, 2003, Segovia et al., 2003, Alonso et al., 2015]. Para ello se pueden emplear monitores de  $^{222}\text{Rn}$  a los que se les acopla un burbujeador con el que extraer el gas del agua o emplear la técnica del centelleo líquido. Esta última se basa en la mezcla de la muestra de agua con una disolución centelleadora o cóctel para, a continuación, realizar la medida de las emisiones alfa en el interior de un espectrómetro de centelleo líquido.

- II. Seguimiento en continuo. El uso de sondas multiparamétricas se ha generalizado en los últimos años (Figura 3.8c). Estas permiten tanto adquirir como almacenar y transmitir en tiempo real el registro de los parámetros fisicoquímicos del agua en zonas volcánicas.

También, durante la última década se están desarrollando equipos con los que registrar en continuo la cantidad de gas disuelto en el agua, principalmente  $\text{CO}_2$  [Johnson et al., 2010, De Gregorio et al., 2011, Inguaggiato et al., 2011]. Si bien existen diversas técnicas, todas se basan en el uso de una membrana permeable al gas pero no al agua como es el caso del teflón.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

53 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Figura 3.8: Toma de muestras de agua y medida de los parámetros fisicoquímicos en dos galerías de Tenerife (a) y (b). Sonda multiparamétrica para el seguimiento en continuo de los parámetros fisicoquímicos del agua (c).

Cuando el sistema volcánico se encuentra en un estado de actividad importante, aún sin erupción en curso, no es extraña la formación de plumas en los principales centros eruptivos. Estas plumas son fuertes desgaseficciones del sistema volcánico, de centenares de metros a kilómetros de altura, que son visibles desde varios kilómetros alrededor del centro eruptivo. El  $\text{SO}_2$  es la principal especie del azufre presente en las plumas volcánicas, y su ratio de emisión es considerado como un parámetro de referencia en el seguimiento de la desgaseficción tanto en periodos eruptivos como en aquellos de relativa calma [Bruno et al., 1999, Edmonds et al., 2003, Badalamenti et al., 2004].

Dentro de las técnicas de monitorización de plumas se pueden emplear dos técnicas de las ya comentadas. Por un lado el uso de cámaras térmicas, con las que conocer la distribución de temperaturas y por otro lado, equipos Multi-Gas con las que estimar su composición. Ambos equipos se pueden emplear de forma

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 3.4. GEOLOGÍA

55

directa o remota. Además de estos, existen cuatro equipos remotos especialmente diseñados para medir gases volcánicos en superficie que se aplican al estudio de las plumas:

- I. COSPEC, espectrómetro de correlación empleado para detectar y cuantificar tasas de emisión de SO<sub>2</sub> en volcanes y contaminantes atmosféricos. Mide la radiación proveniente de la luz solar dispersada por la atmósfera y aprovecha la absorción selectiva de radiación UV que presenta el SO<sub>2</sub> entre 300 y 330 nm [Stix et al., 2008].
- II. DOAS, siguiendo el método de Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS, en inglés), en el que la luz UV del sol, dispersada por aerosoles y moléculas en la atmósfera, es recolectada por medio de un telescopio. En general, el límite de detección del instrumento es de 5-10 ppm m, por lo que puede detectar flujos mínimos de hasta 0.3-0.7 kg/s (26-60 t/d) [Louban et al., 2009].
- III. Cámara UV, estas cámaras suelen emplear sensores CCD (*Charge Coupled Device*). Las lentes son de cuarzo para evitar la absorción de radiación UV y pueden ser de longitud focal variable, dependiendo de la geometría en el campo y los objetivos a medir. Para seleccionar el sector o sectores del espectro UV en los cuales absorbe el SO<sub>2</sub>, se incorporan filtros pasa-banda [Tamburello et al., 2011].
- IV. FTIR, equipo basado en la transformada de Fourier en la región infrarroja (IR) de camino abierto, que detecta los gases en la pluma a través de sus absorciones en dicha región del espectro electromagnético. Las medidas son tomadas usando fuentes de radiación IR naturales o artificiales. Permite medir todas las longitudes de onda detectables en la región del infrarrojo simultáneamente, por lo tanto cada espectro registra la composición instantánea de la mezcla entre el gas volcánico y el aire [Burton et al., 2007].

### 3.4. Geología

Aunque estrictamente no se trate de una técnica de vigilancia volcánica, la geología proporciona una valiosa información del sistema volcánico [Sigurdsson et al., 2015] que complementa a la perfección los datos recabados por las técnicas descritas anteriormente.

La aplicación de la geología en el conocimiento e investigación de los volcanes se hace a través del estudio de las rocas (petrología) y depósitos originados

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

55 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

55 / 229

en eventos eruptivos pasados y actuales, lo cual permite reconstruir la historia eruptiva del sistema volcánico, las fechas de ocurrencia de las erupciones (mediante dataciones), cómo fueron dichas erupciones y el posible comportamiento de eventos futuros [Carracedo et al., 1999, Meletlidis et al., 2012, Sigurdsson et al., 2015].

Con esta información es posible elaborar mapas de peligrosidad volcánica, los cuales son una herramienta indispensable en la planificación y prevención de los desastres ocasionados por las erupciones volcánicas es decir, contribuir en la reducción del riesgo volcánico.

### 3.5. Otras técnicas

Como consecuencia de que la volcanología en general, y la vigilancia volcánica en particular, son campos multidisciplinarios, la proliferación de técnicas que complementan a las ya mencionadas es enorme. Entre ellas destacan:

#### i) Gravimetría

Las áreas volcánicas están caracterizadas por fuertes contrastes de masa y/o densidad. Además, en periodos de actividad volcánica, es habitual detectar variaciones espacio-temporales del valor de la gravedad originadas por los distintos procesos magmáticos, que en general involucran cambios en la densidad [Dzurisin, 2006, Sainz-Maza Aparicio, 2017].

En volcanología, el uso tradicional de la gravimetría ha sido la producción de mapas de anomalías de Bouguer orientados al conocimiento de la estructura del subsuelo [Dzurisin, 2006, Sainz-Maza Aparicio, 2017]. En los últimos años también se han desplegado gravímetros para el registro en continuo de la gravedad en un emplazamiento fijo.

#### ii) Geomagnetismo

En las zonas volcánicas pueden producirse diversos fenómenos físicos que hagan variar el campo magnético a escala local como cambios en el estado de esfuerzos y/o materiales de la corteza así como emplazamientos y enfriamientos de cuerpos magmáticos, los cuales adquieren imanaciones remanentes [Sigurdsson et al., 2015].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 3.5. OTRAS TÉCNICAS

57

El estudio en continuo del campo magnético mediante magnetómetros desplegados en forma de redes permite identificar cambios que puedan estar relacionados con la actividad volcánica [López et al., 2012, Sigurdsson et al., 2015].

#### iii) Geoelectricidad

Las técnicas geoelectricas, tomografía de resistividad eléctrica y medida del potencial espontáneo principalmente, miden distintos parámetros eléctricos propios de los materiales de la corteza terrestre permitiendo su caracterización, la descripción de su distribución en el subsuelo, la identificación de la presencia de distintas capas, fallas, límites estructurales, etc. [Finizola et al., 2002, Barde-Cabusson et al., 2009, Villasante-Marcos et al., 2014].

En el caso de las áreas volcánicas, permiten mejorar la caracterización estructural de los edificios volcánicos y su situación de estabilidad o inestabilidad, así como el estudio de los sistemas hidrotermales [Finizola et al., 2002, Barde-Cabusson et al., 2009, Villasante-Marcos et al., 2014] que normalmente suelen encontrarse en áreas volcánicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

57 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

58 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Capítulo 4

### Minería del agua

El hecho de que las Islas Canarias sean un archipiélago volcánico, unido a una climatología singular, ha condicionado enormemente el aprovechamiento de sus recursos naturales, principalmente, la captación de los recursos hídricos [Santamarta et al., 2013].

En el archipiélago la principal fuente de abastecimiento de agua se encuentra en el subsuelo. Este hecho está mucho más extendido en las islas occidentales mientras que en las orientales, debido a la escasez del recurso, la erosión y la evapotranspiración, la principal fuente hídrica es la desalación.

A comienzos del siglo XX, y con la revolución industrial de por medio, la demanda de agua se vio incrementada notablemente. A este hecho contribuyó de manera decisiva el tipo de cultivo que se estaba introduciendo en las islas en aquella época, la caña de azúcar, gran demandante de agua [Santamarta et al., 2013]. En ese momento se establecieron los primeros sistemas de extracción de agua subterránea mediante la perforación de galerías en altura y pozos en zonas costeras. Estos últimos estuvieron condicionados por las capacidades técnicas de las bombas de aquel tiempo.

Los dos tipos de acuíferos más habituales en las Islas Canarias son el acuífero de vertiente y el acuífero costero [Santamarta, 2009]. El primer tipo se encuentra entre la cota 400 m y las zonas más elevadas de las islas. Se encuentra sobre-elevado debido a que los diques basálticos forman enjambres y celdas donde el agua queda almacenada. La mayor concentración de estos diques se sitúa en las dorsales de las islas, lo que unido a que son zonas con una alta pluviometría, da lugar a que los acuíferos se encuentren elevados. El aprovechamiento de esta reserva de agua se realiza principalmente mediante galerías.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

El segundo tipo, el acuífero costero, se sitúa cerca del mar y se encuentra más explotado debido a que los núcleos de población y explotaciones agrícolas se establecen cerca de la costa, a lo que hay que añadir su menor coste de explotación. A diferencia del acuífero de vertiente, a este último le afectan las mareas, y debido a la sobreexplotación que sufren suelen presentar efectos de intrusión marina.

Tabla 4.1: Número de galerías y pozos por isla [Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2020, Consejo Insular de Aguas de La Palma, 2020, Consejo Insular de Aguas de El Hierro, 2020, Consejo Insular de Aguas de La Gomera, 2020, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, 2020, Consejo Insular de Aguas de Lanzarote, 2020, Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura, 2020]

Isla	Galerías	Pozos	Total
Tenerife	1124	1521	2645
Gran Canaria	431	1876	2307
La Palma	187	84	271
Fuerteventura	9	81	90
La Gomera	8	71	79
El Hierro	12	24	36
Lanzarote	7	8	15

#### 4.1. Galerías

A finales del siglo XIX comenzaron a perforarse las primeras galerías en aquellos puntos donde era más evidente la posible existencia de una reserva de agua subterránea, es decir, en los manantiales naturales [Santamarta, 2009].

Las galerías, que en algunos casos se adentran entre 2 y 4 km en el edificio insular llegando incluso alguna de ellas a los 7 km, configuran auténticos laboratorios de exploración de la hidrogeología insular y forman parte del patrimonio geológico y minero del archipiélago con más de 3000 km construidos [Santamarta, 2016] (Figura 4.2).

En el caso del archipiélago canario, las galerías constituyen una fuente primordial en el abastecimiento de agua potable para el desarrollo de las economías insulares, sobretudo en las islas occidentales. Aproximadamente del 60 % de los recursos hídricos de Canarias se obtienen mediante captaciones de aguas subterráneas: galerías, pozos o sondeos [Santamarta, 2009].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

4.1. GALERÍAS

61



Figura 4.1: Sistema de transporte por vagonetas (a) y alumbramiento de agua (b) en la galería Vergara, Tenerife. Interior de la galería La Fuente Santa en Fuencaliente, La Palma (c). Vista de la bocamina de la galería Río de Guía en Tenerife (d).

i) Antecedentes históricos

La construcción de las galerías fue una necesidad provocada principalmente por los dos motivos expuestos anteriormente: unos cultivos que a principios del siglo XX demandaban una gran cantidad de agua y el crecimiento de la población [Santamarta, 2009].

La primera galería o mina de agua conocida en Canarias data del año 1897, fue la conocida como Roque Negro y Los Catalanes en el macizo de Anaga, en el norte de Tenerife [Santamarta, 2016]. A principios del siglo XX surgen las primeras iniciativas organizadas de explotación de las aguas subterráneas y la creación de las llamadas Sociedades de Investigación, Explotación y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas [Santamarta, 2009].

En esa época la ubicación de las perforaciones atendía principalmente a la localización de los nacientes naturales, por lo que las primeras infraestructuras

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

61 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

62

#### CAPÍTULO 4. MINERÍA DEL AGUA

fueron de tipo galería-naciente con el fin de mejorar los rendimientos de estos alumbraamientos naturales [Santamarta, 2009].

En la primera mitad del siglo XX se intensifica la actividad perforadora hasta que a mediados de la década de los sesenta se había completado el 90 % de las infraestructuras que existen en la actualidad. En esos años en Tenerife se alcanzó la cota más alta de producción, cerca de los 7000 L/s (221 hm<sup>3</sup>/año) [Santamarta, 2009].

##### ii) Perforación

Las galerías son túneles sin boca de salida y de pequeña sección, desde 1.8 m<sup>2</sup> las más antiguas a 4 m<sup>2</sup> las más modernas (Figuras 4.1c y d). Presentan una longitud variable, pudiendo alcanzar los 7 km, y son perforadas con una ligera pendiente ascendente (1-2%) para facilitar el drenaje del agua por gravedad en el caso de alumbraamiento (Figura 4.1b). Por lo general, el agua es conducida hasta la salida (bocamina) (Figura 4.1d) a través de un canal o tubería, y de ahí mediante bajantes hasta los centros de consumo [Santamarta, 2009, 2016].

Atendiendo al Plan Hidrológico Insular de Tenerife [Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2015], este tipo de infraestructuras se pueden clasificar en:

- Galería-naciente: es el tipo más primitivo de captación realizada en nacientes naturales. El agua procede de acuíferos colgados cercanos a la superficie, por lo que el caudal fluctúa con la pluviometría.
- Socavón: infraestructuras de corta longitud, centenares de metros, que nunca han alumbrado agua.
- Galería en trancada: obras de pequeña longitud que interceptan la salida del acuífero cerca del nivel del mar, son perforadas cerca de la costa. Su traza es descendente, normalmente los primeros centenares de metros, y las aguas que alumbran requieren de bombeo.
- Galería convencional: perforaciones profundas (hasta 7 km) que drenan o han drenado agua de la zona saturada principal.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

62 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

#### 4.1. GALERÍAS

63

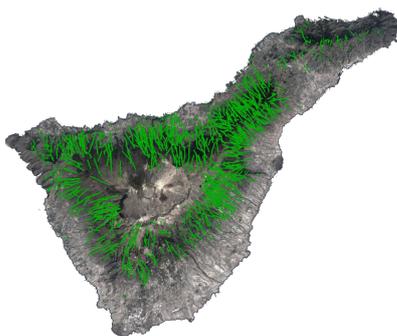


Figura 4.2: Localización y traza de las galerías en la isla de Tenerife.

A esta clasificación se puede añadir un tipo más, muy característico de la isla de El Hierro, en el que se combina un pozo canario tradicional con la perforación de una galería convencional en su fondo [Santamarta, 2016].

Las galerías normalmente se encuentran orientadas hacia las dorsales (Figura 4.2) y en su perforación no es posible aplicar técnicas continentales como máquinas tuneladoras o perforadoras debido, entre otros motivos, a no presentar boca de salida [Santamarta, 2009]. El mayor inconveniente se encuentra en que el material volcánico es muy heterogéneo, por lo que la sustentación y frente de ataque de la tuneladora presenta muchos problemas de sujeción [Santamarta, 2009].

El sistema de perforación más extendido se basa en el uso de explosivos mediante cuele manual con herramienta adecuada, o bien por una máquina perforadora de aire comprimido dependiendo de la tipología del terreno. Los rendimientos de avance suelen ser de 4 a 6 m al día con un coste de unos 1500 € [Santamarta, 2009]. Estos trabajos deben estar dirigidos obligatoriamente por un ingeniero técnico o superior de minas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

63 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

En el inicio de la excavación se atraviesa una zona que no está saturada y la excavación se hace en seco. El avance es rápido, y se deben desplegar unos railes para facilitar el transporte de la maquinaria y la eliminación de escombros (Figura 4.1a). La zona saturada se percibe cuando el agua se filtra por la base de la traza de la galería, agua denominado de repisa. Posteriormente, el agua mana por los hastiales hasta que prácticamente llueve bajo tierra (Figura 4.1b). Es conveniente, y muy recomendable, ya que se atraviesan diques basálticos que cierran masas de aguas con volúmenes considerables, practicar un sondeo horizontal con el que estimar las presiones de agua en el frente. El no disponer de este tipo de sondeo ha causado víctimas mortales durante la construcción de algunas galerías [Santamarta, 2009, 2016].

Respecto a los gestores de las galerías es importante comentar que el alumbramiento y la explotación de las aguas ha sido tradicionalmente una actividad económica en manos privadas bajo la tutela de la Administración, canalizada preferentemente a través de grupos o sociedades creadas para tal fin [Santamarta, 2009, 2016].

Muchas galerías se encuentran abandonadas, bien porque han quedado secas, han dejado de drenar agua (Figura 4.1d), o porque la calidad del agua que alumbran es deficiente y se desaconseja su uso. El Gobierno de Canarias ha acometido la primera regulación autonómica sobre las captaciones de agua subterránea mediante un decreto para la seguridad en galerías y pozos [Gobierno de Canarias, 2008]. Una normativa impulsada por el trágico suceso acaecido en Piedra de los Cochinos en Tenerife [Canarias Ahora, 2007], que ha llevado a clarificar las competencias administrativas y advertir de los peligros que representan estas instalaciones.

## 4.2. Pozos

Los pozos canarios son una obra de perforación vertical excavada a mano con un diámetro mínimo de 1.5 m, aunque es frecuente que alcancen los 3.5 m, con máximos de hasta 6.5 m, y por lo general se encuentran situados cerca de la costa (Figura 4.3). Su profundidad habitual está entre 20 y 30 m aunque se han llegado a alcanzar los 700 m. Algunos pozos disponen en su base de galerías con las que incrementar la captación, lo que implica que deban disponer de varias bombas en serie para poder extraer los caudales alumbrados [Santamarta, 2009, 2016].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

4.2. POZOS

65

Como se ha indicado, requieren de una bomba de achique para poder extraer el agua una vez alcanzado el nivel freático, permitiendo así la continuación de los trabajos. También suelen tener vigas de hormigón o acero para disponer de un pórtico para el cabestrante (popularmente denominado *winche*) y así facilitar los trabajos de perforación y mantenimiento [Santamarta, 2009, 2016].

En terrenos sueltos, como los compuestos por piroclastos, es necesario revestir la obra para evitar posibles derrumbes de las paredes. Para ello se emplea piedra revestida, bloque de material volcánico, cemento o anillos de hormigón prefabricados que son colocados a medida que avanza la perforación. Esta es una medida de seguridad muy importante para el personal, a la que hay que añadir el uso de detectores de gases puesto que algunos pozos presentan gases tóxicos como el dióxido de carbono [Santamarta, 2009].



Figura 4.3: Vista general del pozo Tigaday, El Hierro.

Los pozos tienen asociados dos problemas típicos [Santamarta, 2009, 2016]:

- I. La mayoría de ellos se sitúa cerca de la costa donde es más fácil interceptar la descarga del acuífero por lo que se ven sometidos al proceso de intrusión marina. Allí generalmente se encuentran sobreexplotados, lo que agrava esta circunstancia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

65 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

II. Energético, ya que la extracción del agua requiere de grandes cantidades de energía.

### 4.3. Sondeos

Los sondeos son una perforación realizada por medios mecánicos, preferentemente vertical, de diámetro inferior a 1.5 m siendo las dimensiones más habituales entre los 0.15 y 0.70 m (Figura 4.4). Pueden alcanzar grandes profundidades y tienen un coste normalmente inferior a cualquier otro tipo de captación. Actualmente son las obras hidráulicas más utilizadas por su rapidez de ejecución y sencillez de instalación [Santamarta, 2009, 2016].



Figura 4.4: Vista interior del sondeo de Montaña Majúa en Tenerife, propiedad del Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

La técnica de excavación más extendida en terrenos volcánicos es la rotoperforación; combinación de la percusión (fracturación y trituración de la roca por la acción de golpeo de un instrumento pesado) y la rotación (acción de arrancar partículas por medio de un elemento cortante sometido a una fuerza giratoria y que provoca la rotura de la roca por compresión). Como dato orientativo, es normal un avance de 8 a 10 m/d para una jornada de 8 h y en todo momento es

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

#### 4.4. APLICACIONES A LA VIGILANCIA VOLCÁNICA

67

necesario recolectar muestras de las formaciones interceptadas para el reconocimiento del terreno por parte de la Administración [Santamarta, 2009].

El coste de un sondeo en terreno volcánico difiere notablemente de uno en terrenos continentales debido a la heterogeneidad del terreno y a la dureza que presentan los basaltos. A esto se suma la poca competencia que existe entre las empresas dedicadas a estas tareas. En general, el coste es algo que dependerá de cada instalación, con enorme influencia de diámetros y profundidades. Solo el coste de perforación podría rondar los 300-400 € por metro lineal [Santamarta, 2009, 2016].

#### 4.4. Aplicaciones a la vigilancia volcánica

En esta sección se hace un repaso de los principales trabajos científicos en los que se han estudiado las emanaciones gaseosas en las captaciones de aguas subterráneas del archipiélago canario.

La presencia de gases de origen magmático es un problema inherente a la perforación de este tipo de infraestructuras ya que las islas son enormes edificios volcánicos con una historia eruptiva compleja. La existencia de gases tóxicos es algo conocido desde las primeras perforaciones [Santamarta, 2016]. Un prueba de esto es la utilización de las lámparas de carburo de acetileno desde los inicios de las perforaciones. No solo se empleaban como sistemas de iluminación individual sino también como indicadores, aunque rudimentarios, de los niveles de oxígeno y dióxido de carbono [Santamarta, 2016].

A finales de los años sesenta y mediados de los setenta se publicaron dos trabajos en los que se hace mención a la presencia de gases en galerías [Caldas and Garcia, 1969, Ecker, 1976]. La referencia se hace de forma indirecta puesto que su principal objetivo es el estudio de las aguas subterráneas, y no se proporcionan valores de concentración.

Uno de los primeros trabajos en los que se presentan datos sobre concentraciones de gases es el de Valentin et al. [1990]. En él se hace uso de un conjunto de datos provenientes de 295 galerías y 75 pozos obtenidos durante el proyecto SPA-15 [SPA-15, 1975]. En dicho artículo se propone un modelo de la actividad magmática en la isla de Tenerife [Valentin et al., 1990] apoyándose en los datos de las emanaciones gaseosas en captaciones de agua subterránea.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

67 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

67 / 229

Durante la década de los noventa continuaron publicándose trabajos en los que se presentaban estudios de la concentración de diferentes especies gaseosas [Pérez, 1994, Martín, 1999], pero no fue hasta finales de esa década, y en la entrada del nuevo siglo, cuando se presentaron los primeros estudios con evoluciones temporales.

En la primera década del siglo XXI se intensifica el estudio de las galerías como emplazamientos óptimos para la vigilancia volcánica. De entre las instituciones que llevan a cabo esta tarea destaca, por el número de trabajos publicados, la Universidad de La Laguna. La mayoría de estos tienen como principal actor el  $^{222}\text{Rn}$  y la descripción de su dinámica en el interior de las galerías y su posible aplicación a la vigilancia volcánica [Eff-Darwich et al., 2002, Martín-Luis et al., 2002, Viñas et al., 2004, 2007, Eff-Darwich et al., 2008]. A mediados de esta década se publica el que puede considerarse como el primer artículo que pone de manifiesto la utilidad de las galerías en la vigilancia volcánica [Pérez et al., 2007]. En este trabajo se relaciona la emisión de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$  en el interior de una galería del sur de Tenerife con la crisis sísmica vivida en la isla entre el 2004 y 2005 [Almendros et al., 2007].

Igualmente, existen dos trabajos a destacar durante estos años. Por un lado un estudio de la concentración de dióxido de carbono en el sondeo de Montaña Majúa en Tenerife [Soler et al., 2004] y por otro, el análisis de los gases disueltos, principalmente  $\text{CO}_2$ , en varias galerías de Tenerife [Marrero et al., 2008].

En la última década el número de publicaciones ha disminuido, lo que podría sugerir que las galerías y pozos están perdiendo interés en su aplicación a la vigilancia volcánica. Entre los trabajos publicados podemos destacar los llevados a cabo en el sondeo de Montaña Majúa [Martín-Luis et al., 2015, Steinitz et al., 2015], y el extenso trabajo sobre gases disueltos en galerías de Tenerife [Marrero-Díaz et al., 2015].

Más recientemente, y ahondando en los riesgos que comportan los trabajos en infraestructuras subterráneas, se han publicado datos de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  al que se encuentran expuestos los trabajadores en estos emplazamientos [Santamarta et al., 2020].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Capítulo 5

### Metodología

En este capítulo se describen la instrumentación y técnicas empleadas en la adquisición y procesado de los datos que forman parte de los tres artículos publicados de la presente Tesis.

Como se verá más adelante, en el capítulo resumen de los artículos, tanto la fuente de los datos como la adquisición de los mismos obliga a una diferenciación clara de las metodologías empleadas.

#### 5.1. Geoquímica

##### 5.1.1. Estaciones multiparamétricas

Con el objetivo de registrar la evolución de la temperatura ambiente y del suelo, así como de las concentraciones de dióxido de carbono y  $^{222}\text{Rn}$  en el aire en el interior de galerías y pozos, se diseñaron, desarrollaron y calibraron estaciones multiparamétricas de medida de estos parámetros (Figura 3.7e).

El núcleo de estos equipos estaba formado por un *datalogger* desarrollado por el IGN. Las principales características de este dispositivo son: tres canales y un contador todos de 16 bits, almacenamiento local de los datos en tarjetas SD y un bajo consumo eléctrico [Moure García, 2017].

Para el registro de las temperaturas, ambiente y del suelo, se emplearon termómetros basados en PT100 ( $\pm 0.05$  °C). El termómetro de la temperatura del suelo se enterró unos 10 cm, mientras que el encargado del registro de la temperatura ambiente se situó entre 20 y 40 cm sobre el suelo de la galería (Figura 5.1).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

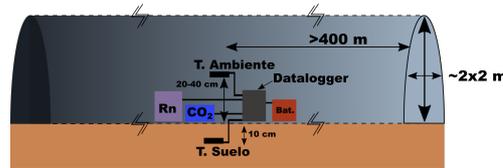


Figura 5.1: Esquema general de una estación para la medida de las temperaturas y concentración de gases en el interior de una galería.

La concentración de CO<sub>2</sub> fue medida empleando sensores basados en la tecnología NDIR (*Non Dispersive Infrared*) del fabricante *SenseAir* (3% vol, ± 30 ppm ± 3% de la medida) [SenseAir, 2018]. En el caso de la concentración de <sup>222</sup>Rn, se emplearon monitores RM-70 del fabricante *Aware Electronics* basados en tubos Geiger (± 4 cpm) [Aware Electronics, 2018]. Ambos sensores fueron depositados sobre el terreno (Figura 5.1), en la parte más baja de la sección transversal de la galería, para asegurar una correcta medida de la concentración de ambos gases, sobretodo del dióxido de carbono.

Como configuración por defecto, estas estaciones tenían un periodo de muestreo de 30 min y eran alimentadas por baterías de 12 V.

Se realizó una adaptación de estas estaciones con el fin de medir la concentración de <sup>222</sup>Rn en el interior de un pozo en El Hierro (RSIM). Esta estación solo contaba con un contador, también desarrollado por el IGN [Moure García, 2017], y un monitor RM-70 [Aware Electronics, 2018]. Este equipo registraba la concentración de <sup>222</sup>Rn cada 10 min y era alimentado eléctricamente por baterías de 12 V.

En la Tabla 5.1 se hace un resumen de la localización de todas las estaciones así como el artículo en el que están incluidas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 5.1. GEOQUÍMICA

71

Tabla 5.1: Estaciones multiparamétricas empleadas en la presente Tesis, especificando: parámetros registrados, localización, profundidad y nombre de la galería de cada uno de los emplazamientos.

Estación	Parámetros	Isla	Profundidad (m)	Emplazamiento	Artículo
ST01	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	Tenerife	1000	Galería Río de Guía	1
ST02	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	Tenerife	1600	Galería Río de Guía	1
ST03	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	Tenerife	2100	Galería Río de Guía	1
ST04	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	Tenerife	2600	Galería Río de Guía	1
HTAC	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , <sup>222</sup> Rn	El Hierro	400	Galería Tacorón	2
HTIN	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	El Hierro	400	Galería Tincos	2
HVER	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn	El Hierro	400	Galería El Verodal	2
HTIG	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , <sup>222</sup> Rn	El Hierro	400	Galería Tigirote	2
RSIM	<sup>222</sup> Rn	El Hierro	23	Pozo San Simón	2

Por último, y con el objetivo de eliminar la mayor parte de la influencia de los parámetros meteorológicos (presión atmosférica y temperatura ambiente principalmente) se aplicó un filtro paso bajo Butterworth 'zero phase' a las señales de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn analizadas en el segundo artículo.

### 5.1.2. Estaciones de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn difuso

En el tercer artículo se emplearon dos estaciones, QP40 y QP41, para el control en continuo de la emisión difusa a través del suelo del <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (Figura 3.7d) en La Palma.

En este tipo de estaciones, un monitor de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn, RTM2200 del fabricante SARAD [SARAD, 2020], es conectado mediante un circuito cerrado de tubos de silicona a otro de PVC de 70 cm de largo y 16 cm de diámetro, el cual es enterrado completamente de forma vertical. Así, y con ayuda de la bomba integrada en el monitor, se hace circular el aire dentro del sistema cerrado creado para medir de forma continua la concentración en el suelo de ambas especies gaseosas.

Intentando corregir las posibles influencias de los parámetros meteorológicos en las concentraciones de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn, se empleó la regresión lineal múltiple incluyendo los parámetros atmosféricos de dos estaciones meteorológicas cercanas (PASO y FUEN, Figura 6.15b). Al no obtenerse resultados coherentes, probablemente debido a la gran distancia entre estaciones, se optó por la aplicación de filtros paso bajo Butterworth 'zero phase' con los que eliminar la mayor parte de la contribución de los parámetros atmosféricos (12 h y 24 h) en las señales de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

71 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 5.1.3. Perfiles

La distribución espacial de las temperaturas ambiente y del suelo, y de la concentración del dióxido de carbono en el interior de una galería fue llevado a cabo en el primer artículo mediante la realización de diversos perfiles a lo largo de su sección longitudinal.



Figura 5.2: Medida de las temperaturas ambiente y del suelo, y de la concentración de CO<sub>2</sub> durante uno de los perfiles llevados a cabo en el interior de la galería RdG en Tenerife.

La temperatura del suelo se registró introduciendo un termómetro (PT100) a 10 cm de profundidad, mientras que la temperatura ambiente se obtuvo con otro termómetro (PT100) situado 10 cm por encima del terreno. En el caso de la concentración del dióxido de carbono, se empleó el mismo tipo de sensor empleado en las estaciones multiparamétricas [SenseAir, 2018] (Figura 5.2). Estas tres medidas se realizaron cada 200 m a lo largo de la traza de la galería (Tabla 6.1 y Figura 6.2).

En cada punto de los perfiles, y para asegurar una medida con la menor influencia posible por parte del personal, una vez que todos los sensores eran situados en su posición final los operarios se retiraban varios metros en dirección a la bocamina y esperaban 5 min para asegurar un registro estable y fiable.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

#### 5.1.4. Gases del suelo, libres y disueltos

Las muestras de gas del suelo se tomaron en dos puntos (A y B) en el interior de la galería RdG dentro de los trabajos enmarcados en el primer artículo. Se realizaron de la siguiente forma: se insertó un tubo de silicona hasta una profundidad de 40 cm y a continuación, con la ayuda de una jeringa, la muestra de gas se succionó y almacenó en una ampolla de vidrio (Figura 5.3). Para minimizar cualquier posible contaminación, la ampolla se purgó en varias ocasiones con el propio gas del suelo.



Figura 5.3: Toma de muestras de gas del suelo en el interior de la galería RdG.

El gas libre se muestreó dentro de los estudios realizados en el tercer artículo con un periodo de muestreo de entre dos y tres meses, dependiendo de la carga de trabajo del personal del IGN. El gas se succionó y almacenó (Figura 3.6d) empleando un embudo semisumergido, al que se le conectó un tubo de silicona. Al igual que ocurrió con las muestras de gas del suelo, la ampolla fue purgada varias veces con el mismo gas a muestrear.

Las muestras de gas disuelto, también englobadas en el tercer artículo, se tomaron con un periodo de entre dos y tres meses, en función de la carga de trabajo del personal del IGN. El método seguido es el descrito por Capasso e Inguaggiato [1998], basado en el equilibrio de presiones parciales de los gases en la fase líquida y en la gaseosa. Para la toma de la muestra se llena completamente un botella de vidrio (Figura 3.6c), con cuidado de no dejar burbujas de aire en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

su interior, cerrándola a continuación con una tapa de poliuretano para evitar la pérdida de gas pero que permite extraer el gas disuelto con una jeringa para su posterior análisis en el laboratorio.

El análisis de las muestras de gas del suelo, libres y disueltos se realizó en los laboratorios del INGV (*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*) en Palermo, Italia. Allí se determinaron tanto la composición total (cromatografía de gases) como las relaciones isotópicas del carbono ( $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ ) y el helio ( $(\text{R}/\text{R}_s)_c$ ) (ambas mediante espectrometría de masas) siguiendo el procedimiento descrito por Paonita et al. [2012].

En la Tabla 5.2 se hace un resumen de la localización de los puntos de muestreo, el tipo (suelo, libres o disueltos) así como el artículo al que pertenecen.

Tabla 5.2: Tipos de puntos de muestreo, localización y artículo en el que están presentes.

Punto	Tipo de muestra	Isla	Emplazamiento	Artículo
A	Gases del suelo	Tenerife	Galería Río de Guía (2050 m)	1
B	Gases del suelo	Tenerife	Galería Río de Guía (1600 m)	1
QP60	Gases libres	La Palma	Sondeo	3
QP63	Gases disueltos	La Palma	Pozo costero	3

Dentro del análisis de los datos geoquímicos llevado a cabo en el tercer artículo y con el fin de estudiar un posible aporte de helio cortical ( $^4\text{He}_{\text{crist}}$ ), el cual podría explicar las disminuciones y/o variaciones de la relación isotópica del helio corregida,  $(\text{R}/\text{R}_s)_c$ , se aplicó el procedimiento descrito por Ballentine et al. [2002] en la estimación de dicha contribución en los puntos de muestreo QP60 y QP63.

## 5.2. Sismicidad

En la localización y estimación de la magnitud de los eventos sísmicos se empleó un modelo de velocidad basado en tres capas [Dañobeitia et al., 1985]. Las fases P y S fueron picadas manualmente con el fin de mejorar la precisión en la determinación de las profundidades focales. El conjunto de datos sísmicos empleado en el segundo y tercer artículos se obtuvo del catálogo sísmico para las Islas Canarias [IGN, 2019], disponible *online* en la página web del IGN.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 5.2. SISMICIDAD

75

Además de la localización de los eventos y la estimación de la energía sísmica liberada, en el tercer artículo se incluyó un histograma de eventos, el análisis de la diferencia de tiempos de llegada entre las fases P y S y dos análisis más detallados:

- I. Relocalización de los eventos mediante el programa *hypoDD* [Waldhauser, 2001]. En este pos-procesado solo se emplearon los tiempos de llegada de las fases P y S, la distancia máxima entre hipocentros se fijó en 4 km y la condición de seguridad en las iteraciones (*conditional number*) [Waldhauser, 2001] se mantuvo siempre entre 40 y 80. La estimación del error en la relocalización (90% de nivel de confianza) se realizó relocalizando un subconjunto de eventos del catálogo completo seleccionados de forma aleatoria [Schultz et al., 2014].
- II. Determinación del valor de  $b$  y de la magnitud de completitud,  $M_c$ . El primer parámetro, el valor de  $b$ , es una constante que caracteriza la distribución frecuencia de eventos vs magnitud (*FMD* en inglés) para un conjunto de eventos sísmicos. Concretamente estima el ratio entre el número de eventos con magnitudes bajas y altas. De forma general y para catálogos completos, el valor de  $b$  se encuentra alrededor de 1. Sin embargo, en zonas con alta fracturación del terreno se obtienen valores mayores, y en regiones volcánicas se han alcanzado incluso valores superiores a 3. La estimación del valor de  $b$  se ha empleado para identificar reservorios de magma activos, así como en el estudio de la evolución espacial y temporal de la sismicidad durante procesos de reactivación. La determinación del valor de  $b$  en el tercer artículo se realizó con tres métodos diferentes: mínimos cuadrados, máxima probabilidad [Aki, 1965] y *Bootstrap* (empleando el método de máxima probabilidad como estimador). El error para cada uno de los métodos se determinó de la siguiente manera: para el caso de los mínimos cuadrados, el error se calculó a través del error estándar de la regresión lineal; en el método de la máxima probabilidad se usó la ecuación mejorada para la incertidumbre de Shi and Bold [1982]; en el último caso, el método *Bootstrap*, el error se estimó a través del error estándar de la media para 1000 iteraciones. Por último, en la determinación de  $M_c$  se empleó el máximo número de eventos por magnitud en los métodos de mínimos cuadrados y máxima probabilidad. En el caso del método *Bootstrap*, la magnitud de completitud fue estimada mediante el valor medio de las iteraciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

75 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 5.3. Deformación del terreno

La deformación del terreno se monitorizó con ayuda de estaciones GNSS (Tabla 5.3) equipadas con receptores de doble frecuencia (Figura 3.3a). En todas ellas, los datos fueron transmitidos en tiempo real para cuantificar diariamente la deformación del terreno.

Empleando el programa Bernese v5.2 [Dach et al., 2015] se determinaron las coordenadas diarias de cada estación. Para ello se aplicaron los modelos de carga oceánica FES2004 [Lyard et al., 2006] y el centrado absoluto de la fase de antena (IGS, *Internation GNSS Service*). También se incluyeron en este cálculo las órbitas precisas IGS. Igualmente se corrigió el movimiento de placa aplicando el modelo Nuvel-1A [DeMets et al., 1994] y las coordenadas fueron determinadas usando el marco de referencia ITRF2014 [Altamimi et al., 2016].

Tabla 5.3: Estaciones GNSS empleadas en los artículos incluidos en la presente Tesis especificando su acrónimo, la isla donde están instaladas, la institución a la que pertenecen y el artículo en el que son empleadas.

Estación	Isla	Institución	Artículo
FRON	El Hierro	GRAFCAN	2
H101	El Hierro	IGN	2
MAZO	La Palma	GRAFCAN	3
LPAL	La Palma	IGN	3
LP01	La Palma	IGN	3
LP02	La Palma	IGN	3
LP03	La Palma	IGN	3
LP04	La Palma	IGN	3

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

## Capítulo 6

### Resumen de los artículos

Tal y como se ha puesto de manifiesto en los apartados anteriores, las infraestructuras para la captación de aguas subterráneas (galerías, pozos y sondeos) presentes en el archipiélago canario ofrecen una oportunidad única de observación directa tanto de la geología como de la medición y control de las emanaciones gaseosas de origen volcánico.

En este capítulo se hace un resumen, lo más completo posible, de los tres artículos científicos que forman parte de esta Tesis por compendio de publicaciones. La versión publicada de cada uno de ellos se encuentra en la sección apéndices. Es obligado poner de manifiesto que los datos recabados para el análisis e interpretación fueron obtenidos de las diferentes redes de vigilancia volcánica que actualmente tiene desplegadas el IGN en las Islas Canarias.

77

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

77 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.1. Spatial and temporal analysis of temperature and gaseous emission inside a gallery in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands)

### 6.1.1. Contexto geológico

Tenerife es la isla más grande del archipiélago canario (2034 km<sup>2</sup>) y está localizada aproximadamente a 280 km de la costa noroeste de África. La sección subaérea del edificio insular comenzó su formación entre 12 y 8 Ma a partir de erupciones fisurales creándose al menos tres volcanes en escudo [Troll and Carracedo, 2016e], los cuales aún se encuentran presentes como macizos erosionados en las tres esquinas de la isla: Teno (noroeste), Anaga (noreste) y Roque del Conde (sur) (Figura 6.1a).

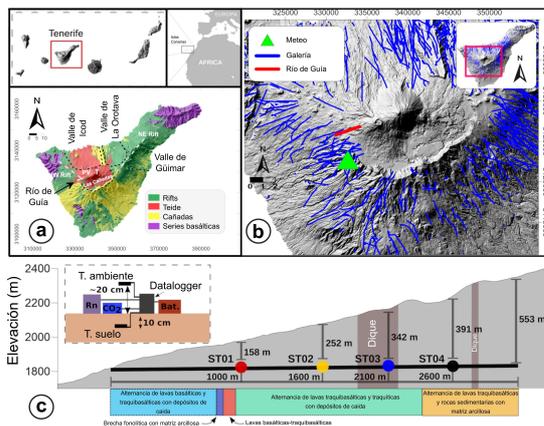


Figura 6.1: Localización y descripción geológica de Tenerife (a). Distribución de galerías en la zona central de Tenerife, líneas azules. Se destacan la galería Río de Guía (RdG) (línea roja) y la estación meteorológica Chavao (triángulo verde) (b). Sección vertical de RdG incluyendo la localización de las cuatro estaciones, la estructura principal de diques identificada por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) y una descripción geológica simplificada (c). En la esquina superior izquierda (c) se muestra una configuración estándar de la estación multiparamétrica.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

79

Hace 3.5 Ma la actividad volcánica migró al centro de la isla, donde la emisión de basaltos y materiales más evolucionados (fonolitas y traquitas) dieron como resultado un gran edificio volcánico conocido como Edificio Cañadas [Troll and Carracedo, 2016e]. Esta actividad culminó con la creación de una gran depresión elíptica (16x9 km) conocida como La Caldera de Las Cañadas (Las Cañadas del Teide) [Carracedo et al., 2007] (Figura 6.1a).

Durante los últimos 175 ka el complejo volcánico Teide-Pico Viejo (PV, Pico Viejo, y T, Teide, en la Figura 6.1a) ha crecido en la parte norte de La Caldera de Las Cañadas, representando la fase más reciente del volcanismo central con la emisión de materiales diferenciados. La última erupción en el interior de la caldera fue la de Chahorra (1798), localizada en el flanco suroeste del estratovolcán Pico Viejo [Romero Ruiz, 1989].

La actividad basáltica reciente se ha concentrado en la dorsal noreste y dorsal noroeste, así como en la zona sur de la isla [Carracedo et al., 2011]. Las últimas tres erupciones históricas se han producido en la dorsal noroeste, la cual, junto con el complejo Teide-Pico Viejo, ha sido la zona más activa durante los últimos 50 ka [Romero Ruiz, 1989] (Figura 6.1a).

### 6.1.2. Resultados

La galería Río de Guía (RdG) tiene una longitud de 3150 m, una pendiente de un 2% y nunca ha alumbrado agua. Con una dirección prácticamente este-oeste, está localizada en el flanco oeste de la isla de Tenerife a una cota de 1820 m (Figuras 6.1a, b). Esta galería fue seleccionada para el estudio por su privilegiada localización, ya que interseca la unión entre la dorsal noroeste y Pico Viejo (Figura 6.1b).

#### i) Perfiles

Se realizaron siete perfiles a lo largo de la galería en siete fechas diferentes, seis distribuidos a lo largo de un año y uno más en 2018 (Tabla 6.1), tomando medidas de la temperatura del aire ( $T_a$ ), del suelo ( $T_s$ ) y de la concentración de  $CO_2$  cada 200 m en cada uno de ellos (Figura 6.2).

La principal característica de la distribución espacial de ambas temperaturas es el máximo presente sobre los 2000 m de profundidad (Punto de Máxima Temperatura, PMT) (Figura 6.2a, b). Este mostró un comportamiento estable tanto en su localización como en su valor absoluto. Los máximos valores registrados para las  $T_a$  y  $T_s$  fueron  $10.6 \pm 0.1$  °C y  $10.5 \pm 0.1$  °C, respectivamente. A partir

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

79 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

de los perfiles medios de ambas temperaturas se pudo definir un valor medio de la temperatura ( $T_m$ ) para el interior de la galería de 8.5 °C.

Tabla 6.1: Estadísticas descriptivas de los siete perfiles realizados en el interior de la galería RdG.  $T_a$  y  $T_s$  representan las temperatura ambiente y del suelo, respectivamente, mientras que  $[CO_2]$  representa la concentración de dióxido de carbono.

ID	Fecha (aammdd)	$T_a \pm 0.1$ (°C)				$T_s \pm 0.1$ (°C)				$[CO_2]$ (ppm)			
		Min	Media	Máx	DE	Min	Media	Máx	DE	Min	Media	Máx	DE
P1	090513	6.8	8.2	10.4	1.2	-	-	-	-	500 ± 45	600 ± 48	1100 ± 63	200
P2	090805	7.2	8.7	10.4	1.0	-	-	-	-	1200 ± 66	4400 ± 162	13800 ± 444	3800
P3	091223	7.2	8.5	10.5	1.0	7.0	8.5	10.4	1.0	900 ± 57	1400 ± 72	1900 ± 487	300
P4	100630	7.2	8.7	10.5	1.0	7.0	8.7	10.5	1.0	1100 ± 63	3900 ± 147	9800 ± 324	3000
P5	101019	7.3	8.7	10.5	1.0	7.0	8.7	10.4	1.0	800 ± 54	2300 ± 99	5400 ± 192	1400
P6	110113	6.8	8.5	10.5	1.1	5.2	8.2	10.4	1.3	400 ± 42	600 ± 48	800 ± 54	200
P7	180605	7.6	8.7	10.6	0.9	7.5	8.9	10.4	0.9	500 ± 45	1000 ± 60	1800 ± 84	400
Perfil medio		7.2	8.5	10.5	1.0	7.0	8.5	10.4	1.0	800 ± 54	2200 ± 96	4900 ± 177	1300

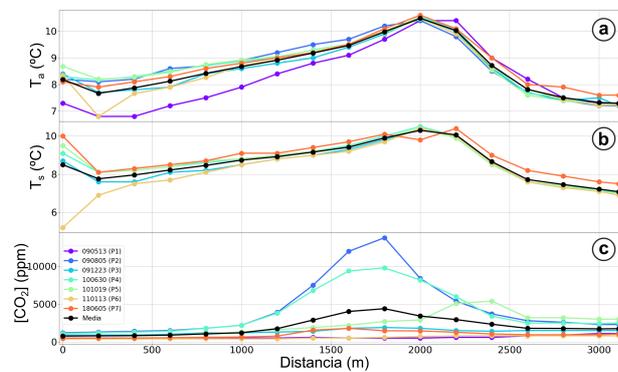


Figura 6.2: Perfiles de la temperatura del aire (a), de la temperatura del suelo (b) y de la concentración de  $CO_2$  (c) en el interior de RdG. En cada panel se ha incluido el perfil medio de cada parámetro (curva negra).

Respecto al  $CO_2$ , por un lado se registraron 'perfiles planos' en los que su concentración permaneció prácticamente constante a lo largo de la galería y muy cerca del valor atmosférico ( $\approx 400$  ppm) (Figura 6.2c) y por otro lado, hubo perfiles que mostraron una gran variación de la concentración de dióxido de carbono a lo largo de la galería. Los valores de  $CO_2$  más bajos se obtuvieron típicamente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaltoyos UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

81

en el periodo frío: P1, P3 y P6 (Figura 6.2c) (los periodos frío y cálido serán descritos más adelante). Por el contrario, las más altas concentraciones de CO<sub>2</sub> se alcanzaron durante el periodo cálido: P2, P4 y P5 (Figura 6.2c). El máximo valor de la concentración de CO<sub>2</sub> fue 13800 ± 444 ppm (P2), 200 m antes del PMT.

En la Figura 6.3 se georeferencian los tres perfiles medios. Los valores máximos de dichos perfiles están localizados al sur de un cono de cinder, Montaña Cruz de Tea (MCT), y en el extremo occidental de la fisura eruptiva de Montaña Chio (MC).

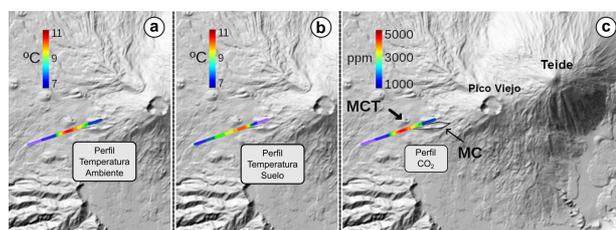


Figura 6.3: Perfiles medios georeferenciados: temperatura del aire (a), del suelo (b) y concentración del dióxido de carbono en aire (c) dentro de la galería RdG.

La primera erupción, MCT, se estima que tuvo lugar durante el Holoceno en base a estudios estratigráficos [Carracedo et al., 2007]. En cambio, la erupción MC ha sido datada en 3933 ± 212 cal años BP [Carracedo et al., 2007]. Además, varios diques coincidentes con la ubicación de PMT, entre los 2000 y 2200 m de profundidad y con una dirección N80O, fueron identificados por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife [Farrujia, 1989]. Estos diques presentan una orientación coincidente con las principales fracturas y alineamiento de conos en la dorsal noroeste [Carracedo et al., 2007].

ii) Muestras de gas del suelo

En 2018 se tomaron muestras de gas del suelo a 2050 m (punto A) y a 1600 m (punto B) de profundidad. Los resultados de los análisis de estas muestras se resumen en la Tabla 6.2. Las concentraciones de oxígeno y nitrógeno fueron muy similares a los valores atmosféricos [Seinfeld and Pandis, 2016], lo cual sugiere una mezcla efectiva entre el aire exterior e interior a esa profundidad. La concentración de metano, similar al valor medio atmosférico, indica que no existía

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

81 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

contribución biogénica o hidrotermal. Por último, y a pesar de los bajos valores de la concentración de CO<sub>2</sub> en ambos puntos, cabe destacar los resultados del δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub>: -6.7 ‰ y -6 ‰ para A y B, respectivamente. Ambos se encuentran dentro del rango típico del MORB (*Mid-Ocean Rift Basalt*), de -4 ‰ a -9 ‰ [Pineau and Javoy, 1983].

Tabla 6.2: Resultados de los análisis del gas del suelo. Las concentraciones están expresadas en ppm.

Punto	Prof (m)	[He]	[H <sub>2</sub> ]	[O <sub>2</sub> ]	[N <sub>2</sub> ]	[CO]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]	[H <sub>2</sub> S]	δ <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> (‰)
A	2050	<5	<5	203900	776700	3.4	1.1	2700	<5	-6.7
B	1600	<5	<5	205300	773600	2.9	0.8	2100	<5	-6.0

iii) Estaciones en continuo

Se desplegaron cuatro estaciones a los 1000 m (ST01), 1600 m (ST02), 2100 m (ST03) y 2600 m (ST04) de profundidad rodeando al PMT, y estuvieron operativas entre noviembre de 2009 y enero de 2011 (Figura 6.1c). Todas ellas registraron T<sub>a</sub> y T<sub>s</sub>, así como las concentraciones de dióxido de carbono y <sup>222</sup>Rn en aire cada 30 min.

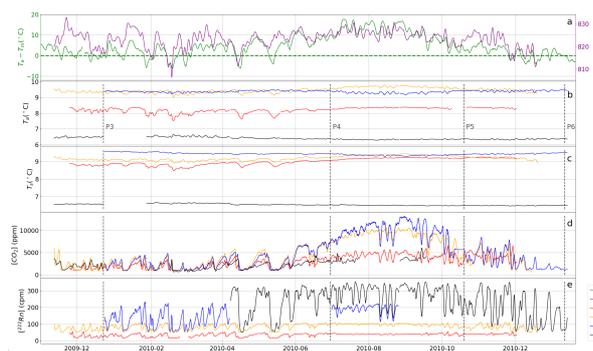


Figura 6.4: Media móvil de 24 h de cada parámetro en cada una de las estaciones. Presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre la T<sub>s</sub> y la T<sub>a</sub> (verde) (a). Evolución de la temperatura del aire (b), temperatura del suelo (c), concentración de dióxido de carbono (d) y <sup>222</sup>Rn (e) en cada estación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>  
 Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG  
 Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA Fecha: 06/10/2020 12:15:48  
 Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 12:59:14  
 José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 13:23:57  
 Vicente Soler Javalcoyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

83

### a) Registros

Basándose en la diferencia entre la temperatura exterior ( $T_e$ ) y la  $T_m$  es posible definir dos estaciones o periodos, frío y cálido, para el ambiente interior de la galería. Los periodos fríos se definieron cuando la  $T_e$  era menor que la  $T_m$  ( $T_e - T_m < 0$ , Figura 6.4a), comprenden desde el inicio del registro hasta finales de mayo de 2010 y desde mediados de noviembre de 2010 hasta finales de enero de 2011. Y el cálido, cuando la  $T_e$  era claramente superior a  $T_m$  ( $T_e - T_m > 0$ , Figura 6.4a), desde el comienzo de junio hasta mediados de noviembre.

Ambas temperaturas permanecieron estables durante todo el registro. Cuanto más profunda se encontraba la estación, menor era la influencia meteorológica externa, como era de esperar [Perrier and Richon, 2010]. Los máximos valores, tanto en la  $T_a$  como en la  $T_s$ , se registraron en las estaciones ST02 y ST03, las más cercanas al PMT. En cambio, los mínimos fueron registrados en ST04, la estación más profunda.

Además de la clara estacionalidad presente en ambas temperaturas, existió una visible diferencia entre las estaciones localizadas antes (ST01 y ST02) y después (ST03 y ST04) del PMT. Las primeras mostraron las menores temperaturas durante los periodos fríos y más altas en el cálido siguiendo la tendencia de la  $T_e$  (Figura 6.4a). En cambio, ST03 y ST04 presentaron una tendencia opuesta (Figura 6.4b, c).

El  $CO_2$  registró su máximo valor en ST03 durante el periodo cálido,  $15349 \pm 491$  ppm. Por lo general, los valores más bajos siempre pertenecieron a la estación ST04 en ambos periodos, frío y cálido. La influencia estacional sobre la concentración de dióxido de carbono es más evidente que en el caso de las temperaturas. Durante el periodo cálido se produjo una clara acumulación en todas las estaciones siendo esta más pronunciada en ST02 y ST03 (Figura 6.4d).

La concentración de  $^{222}Rn$  aumentó con la profundidad a la que se encontraba la estación, tanto en valor medio como en variación. La estación ST01 mostró los valores más bajos mientras que ST04 registró los mayores. Respecto a su nivel base, las estaciones ST02, ST03 y ST04 tuvieron valores similares ( $50 \pm 4$  cpm) durante el periodo frío, significativamente mayor al registrado en ST01 ( $15 \pm 4$  cpm).

Al igual que con los otros parámetros, la concentración de  $^{222}Rn$  mostró un comportamiento estacional. Durante el periodo cálido se produjo una clara acumulación en todas las estaciones, alcanzando su máximo valor en ST04, a diferencia de lo que le ocurrió al  $CO_2$ . Por otra parte, la concentración máxima

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

83 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

en todas las estaciones fue alcanzada por el  $^{222}\text{Rn}$  antes que por el dióxido de carbono (Figuras 6.4d, e): 8 y 10 días en ST01 y ST04, respectivamente, y 38 días en ST02 y ST03.

Con el fin de realizar un análisis más detallado de la influencia de los parámetros externos se eligió una ventana temporal en cada periodo.

a.1) *Periodo Frío: febrero de 2010*

Cuando  $T_e > T_m$  (del 5 al 14 y del 24 al 28) un pequeño proceso de acumulación tuvo lugar en el  $\text{CO}_2$  y  $^{222}\text{Rn}$  en todas las estaciones (Figuras 6.5d, e). En cambio, las temperaturas exhibieron diferentes comportamientos. En ST01 y ST02 se produjo un ligero incremento, mientras que en ST03 y ST04 decrecieron (Figuras 6.5b, c).

En el momento en que  $T_e < T_m$ , entre el 14 y 24 de febrero, se produjo una clara disminución en las concentraciones de ambos gases alcanzando sus niveles base. En cuanto a las temperaturas, estas volvieron a mostrar tendencias diferentes. En ST01 y ST02 decrecieron, mientras que en ST03 y ST04 aumentaron.

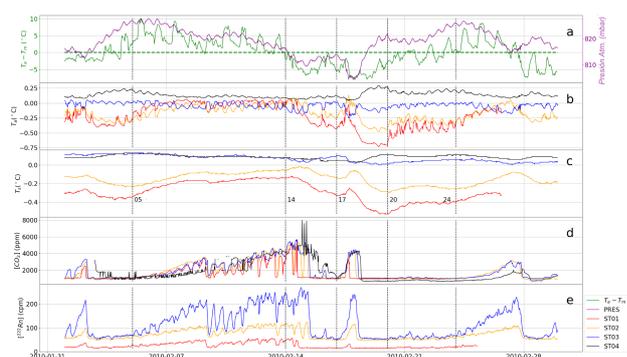


Figura 6.5: Periodo frío, febrero de 2010. Evolución temporal de: presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre  $T_e$  y  $T_m$  (verde) (a), temperaturas del aire (valor  $T_m$  sustraído) (b), temperaturas del suelo (valor  $T_m$  sustraído) (c), concentraciones de dióxido de carbono (d) y  $^{222}\text{Rn}$  (e) en aire.

En el mismo periodo, las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  y dióxido de carbono parecieron estar controladas por la presión atmosférica. Cuando esta decrecía, la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

85

concentración de ambos gases aumentaba primero en las estaciones más profundas. En cambio, cuando la presión aumentaba, las concentraciones decrecían, haciéndolo primero en las estaciones más cercanas a la bocamina. Ambas temperaturas mostraron igualmente una dependencia con la presión atmosférica. Al disminuir esta, las temperaturas en ST01 y ST02 aumentaron mientras que en ST03 y ST04 cayeron ligeramente. En cambio, cuando la presión aumentaba, se registró un comportamiento opuesto.

a.2) *Periodo Cálido: del 1 de agosto al 15 de septiembre de 2010*

En esta ventana temporal la  $T_e$  fue siempre superior a  $T_m$  (Figura 6.6a). La estabilidad en ambas temperaturas así como los procesos de acumulación en ambos gases fueron evidentes.

La concentración de dióxido de carbono mostró dos niveles bien diferenciados, el más bajo en ST01 y ST04 y el más alto en ST02 y ST03. Por tanto, y como era de esperar, los máximos valores se registraron entre ST02 y ST03 como habían sugerido los perfiles (P2 y P4 en la Figura 6.2c). Estas dos estaciones se alternaron en el registro del máximo valor de  $CO_2$ , incluso a lo largo de un solo día (Figura 6.6d). En cambio, la concentración de  $^{222}Rn$  mostró una clara estratificación, siendo el valor de este más alto cuanto más profunda se encontraba la estación. Esto sugiere que el origen del  $^{222}Rn$  en el interior de la galería podía no estar relacionado con el PMT [Martin-Luis et al., 2015].

Debido a que  $T_e > T_m$ , la única influencia externa esperable debería estar relacionada con la presión atmosférica. En las estaciones ST01 y ST02 se producía una ligera caída cuando la presión atmosférica aumentaba, mientras que en ST03 y ST04 se observaba un aumento. Por el contrario, cuando la presión disminuía el comportamiento de las temperaturas era el contrario (del 9 al 22 de agosto) (Figura 6.6b, c).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

85 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

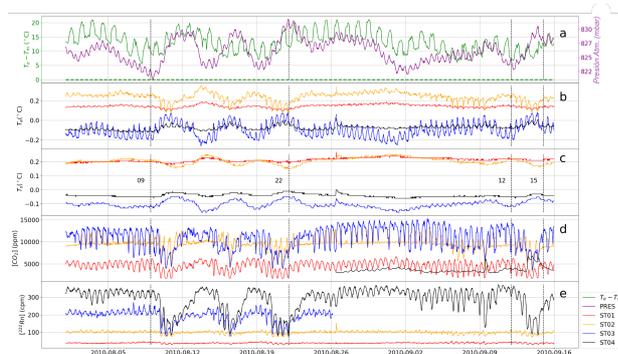


Figura 6.6: Período cálido, del 1 de agosto de 2010 al 15 de septiembre de 2010. Evolución temporal de: presión atmosférica (PRES, violeta) junto a la diferencia entre  $T_e$  y  $T_m$  (verde) (a), temperaturas del aire (valor  $T_m$  sustraído) (b), temperaturas del suelo (valor  $T_m$  sustraído) (c), concentraciones de dióxido de carbono (d) y  $^{222}\text{Rn}$  (e) en aire.

Cuando la presión atmosférica aumentaba, se registró un claro decremento en la concentración de  $\text{CO}_2$  en ST01, ST02 y ST03 (del 9 de agosto al 22 de septiembre y del 12 al 15 de septiembre), seguido de un incremento en ST04 pocos días después (del 13 al 15 de septiembre) (Figura 6.6d). En cambio, con la misma tendencia en la presión, hubo un abrupto descenso de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en ST03 y ST04 alcanzando valores similares a los de ST02 (Figura 6.6e). Al mismo tiempo, ST01 y ST02 mostraron una ligera disminución en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ . En cuanto la presión atmosférica se estabilizaba nuevamente, ambas concentraciones regresaban a los valores previos. En el caso de producirse una disminución de la presión no se apreció ningún efecto o influencia sobre las concentraciones.

*b) Contenido espectral*

El análisis espectral también arrojó resultados muy diferentes según el periodo de análisis, frío o cálido (Figura 6.7).

Así, durante el periodo frío todos los parámetros mostraron una clara componente espectral de 12 h (periodo semidiurno, S2), el cual coincide con la principal componente de la presión atmosférica. En ambas temperaturas, los S2 más altos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

87

están presentes en ST02 y ST03, las más cercanas al PMT.

En cuanto a la concentración de CO<sub>2</sub>, el S2 muestra una clara disminución a lo largo de la galería. En cambio, el <sup>222</sup>Rn presenta el S2 de mayor amplitud en ST04. Respecto a la componente espectral de mayor amplitud (24 h) asociada a la T<sub>e</sub>, periodo diurno S1, no se aprecia influencia significativa.

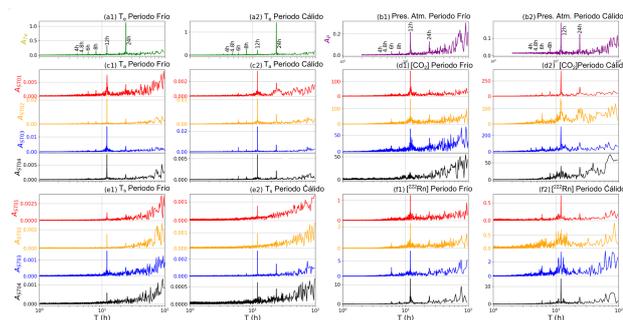


Figura 6.7: Contenido espectral de cada parámetro (c-f) en cada estación durante los periodos frío y cálido. Se han incluido también los parámetros externos: presión atmosférica (a) y temperatura externa (b). Todos los espectros se han representado frente al periodo, T, en horas.

Durante el periodo cálido, S2 sigue siendo la componente espectral más importante en todos los parámetros y todas las estaciones. Existe un decremento generalizado en su amplitud en ambas temperaturas respecto al periodo frío, excepto en la estación ST02. El contenido frecuencial de la concentración de CO<sub>2</sub> muestra un aumento generalizado de S2 con respecto al periodo frío sugiriendo que la presión atmosférica tiene una influencia mucho más marcada.

Respecto al <sup>222</sup>Rn, la amplitud de S2 es menor que en el periodo frío. Además de esto, dos nuevas componentes hacen acto de presencia, siendo más claras en ST03 y ST04. La primera con un periodo de 11 h y la segunda con uno de 13.1 h.

La componente S1 de la T<sub>e</sub> está claramente presente en todos los parámetros con valores más altos que en el periodo frío.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

87 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

c) *Correlaciones*

Con el fin de cuantificar la influencia de los parámetros externos, se estimaron los coeficientes de correlación de Pearson entre la presión atmosférica y la diferencia  $T_e - T_m$  con cada uno de los parámetros registrados (Tabla 6.3).

Tabla 6.3: Coeficientes de correlación entre los parámetros internos y los meteorológicos.

	$T_e - T_m$				Presión Atmosférica			
	ST01	ST02	ST03	ST04	ST01	ST02	ST03	ST04
$T_a$	0.6	0.8	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	0.4	0.5
$T_s$	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.1	0.4	0.1
$[CO_2]$	0.6	0.8	0.8	0.5	-0.4	-0.1	-0.3	-
$[^{222}Rn]$	0.5	0.7	0.6	0.5	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4

Ambas temperaturas mostraron una correlación positiva respecto a  $T_e - T_m$  en ST01 y ST02, mientras que en ST03 y ST04 la correlación fue negativa. En el caso de los gases, estos presentan una correlación positiva con  $T_e - T_m$ , indicando que el proceso de acumulación tenía lugar cuando  $T_e > T_m$ .

En cuanto a la influencia de la presión atmosférica, las concentraciones de  $CO_2$  y  $^{222}Rn$  muestran correlaciones negativas con la presión atmosférica como era de esperar [Perrier et al., 2001, Martín-Luis et al., 2015]. Por el contrario  $T_a$  y  $T_s$  tuvieron un comportamiento diferente. En ST01 y ST02, estos parámetros mostraron valores de correlación negativos mientras que ST03 y ST04 fueron positivos.

d) *Ventilación y acumulación*

Es posible llevar a cabo una descripción simplificada del régimen de ventilación de la galería. Perrier et al. [2003] propusieron la siguiente expresión para relacionar el ritmo de ventilación con las concentraciones de  $^{222}Rn$ :

$$\lambda_v = \lambda \left( \frac{A_c}{A_f} - 1 \right) \quad (1)$$

donde  $A_c$  y  $A_f$  representan las concentraciones de  $^{222}Rn$  en los periodos cálido y frío, respectivamente,  $\lambda$  es la constante de decaimiento del  $^{222}Rn$  ( $7.56 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) y  $\lambda_v$  es el ritmo de ventilación durante el periodo frío. Esta ecuación puede ser empleada para estimar el ritmo de ventilación durante el periodo frío, donde la ventilación natural predomina.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

89

Los valores medios obtenidos para el ritmo de ventilación respecto de la constante de decaimiento, ventilación normalizada ( $\lambda_v/\lambda$  [Perrier et al., 2007]) se muestran en la Tabla 6.4. Hay una clara diferencia entre las estaciones localizadas antes (ST01 y ST02) y después (ST03 y ST04) de PMT. Las más profundas muestran una  $\lambda_v/\lambda$  similar en torno a 0.6, valor que duplica al calculado para las otras dos estaciones, con valores cerca del 0.3.

Este factor determina el tiempo de residencia,  $\tau = 1/\lambda_v$ , en cada estación. Tanto ST01 como ST02 muestran los mayores tiempos de residencia, 18.4 y 15.9 días, respectivamente, mientras que ST03 y ST04 presentan valores claramente inferiores, 8.7 y 8.8 días, respectivamente.

Tabla 6.4: Ventilación y parámetros de acumulación.

Estación	<sup>222</sup> Rn		CO <sub>2</sub>			
	Periodo frío (cpm)	Periodo cálido (cpm)	$\lambda_v/\lambda$	$\tau$ (d)	$\beta$ (d)	$\Phi$ (ppm/d)
ST01	40	30	0.3	18.4	28.4	95.5
ST02	103	76	0.35	15.9	29.6	246.0
ST03	211	129	0.63	8.7	36.7	260.1
ST04	323	199	0.62	8.8	18.3	92.4

El proceso de acumulación del CO<sub>2</sub> durante el periodo cálido puede ajustarse mediante una curva exponencial [Perrier and Richon, 2010]:

$$[CO_2] = \alpha(1 - e^{-t/\beta}) + \gamma \quad (2)$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son constantes.

El parámetro más importante es  $\beta$ , tiempo característico, el cual representa el tiempo necesario para que el 63% del nivel de saturación sea alcanzado. El mayor valor de  $\beta$ , 36.7 días, fue obtenido para ST03, mientras que el más bajo, 18.3 días, correspondió a ST04 (Tabla 6.4). Las estaciones ST01 y ST02 muestran valores similares, 28.4 y 29.6 días, respectivamente (Tabla 6.4).

Si se deriva la Ec. (2) respecto del tiempo, se obtiene una estimación de la velocidad de acumulación del CO<sub>2</sub>:

$$\frac{\partial[CO_2]}{\partial t} = \frac{\alpha}{\beta}(e^{-t/\beta}) \quad (3)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

89 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

El cociente  $\alpha/\beta$ , que puede definirse como  $\Phi$ , proporciona una estimación de la velocidad del incremento de la concentración del  $\text{CO}_2$ . Los mayores valores de  $\Phi$  están asociados con ST03 y ST02, 260.1 y 246 ppm/d, respectivamente (Tabla 6.4). Los valores obtenidos para las estaciones ST01 y ST04 son similares entre ellos pero más bajos que los de las otras dos.

### 6.1.3. Discusión y conclusiones

La distribución espacial de las temperaturas en el interior de la galería RdG fue muy estable como ponen de manifiesto los perfiles, los cuales cubrieron todas las estaciones del año (Figuras 6.2a, b). Ese no fue el caso del  $\text{CO}_2$ , debido principalmente a su fuerte dependencia de los parámetros meteorológicos externos, presión atmosférica y temperatura ambiente principalmente [Eff-Darwich et al., 2002, Martín-Luis et al., 2015].

Para poder explicar la variabilidad del  $\text{CO}_2$  es necesario considerar el proceso de ventilación natural. Cuando la  $T_e$  era inferior a  $T_m$  (periodo frío), el proceso de ventilación natural favorece la entrada de aire externo (atmosférico) en la galería diluyendo las concentraciones de los gases del interior [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Faimon et al., 2011]. Esto permite explicar los perfiles definidos como 'planos' (P1, P3, P6 y P7) (Figura 6.2c y Tabla 6.2). En cambio, cuando la  $T_e$  era superior a la  $T_m$ , la ventilación natural era prácticamente cancelada, favoreciendo la acumulación de los gases en el interior de la galería [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Gregorič et al., 2011], perfiles P2, P4 y P5 (Figura 6.2c y Tabla 6.2).

Como se mencionó, la principal característica detectada en el análisis de los perfiles fue el PMT, anomalía térmica localizada a 2000 m de la bocamina. En dicha zona se ha descrito la mayor intrusión de diques en la galería [Farrujia, 1989]. A esa profundidad, podría existir un área volcánico-tectónica activa, coincidente con la dirección principal de la dorsal noroeste [Giammanco et al., 1999, Viveiros et al., 2017], lo que permitiría una repetida emisión magmática y facilitaría el ascenso de gases de origen profundo [Viveiros et al., 2017]. Chiodini et al. [2001] denominan a este tipo de estructuras como Estructuras de Desgasificación Difusa, EDD. Esta fuente profunda fue confirmada por los resultados obtenidos para el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  en dos puntos del interior de la galería. Los valores de la concentración de  $\text{CO}_2$  y de la relación isotópica del carbono en ambos puntos (Tabla 6.2) apuntan a un origen profundo [Chiodini et al., 2008]. Hernández et al. [2017] encontraron valores para  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  entre 2011 y 2016 en la dorsal noroeste en el rango de -28.7 ‰ a -6.5 ‰. Este valor máximo, que dichos autores atribuyen

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

91

a una contribución magmática, concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

En resumen, tres conjuntos de datos con diferentes características: perfiles, descripción geológica y valores de  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  apuntan a que la principal fuente de  $\text{CO}_2$  en el interior de la galería, con una clara componente magmática, se localizaba a unos 2000 m de la bocamina. El área volcánico-tectónica o EDD hallada en ese punto, la cual podría estar relacionada con las erupciones MCT y MC (Figura 6.3), parece haber creado un camino de ascenso preferencial para los gases magmáticos [Chiodini et al., 2001, Finizola et al., 2002, Barde-Cabusson et al., 2009].

Es posible proponer un modelo conceptual para la dinámica de las temperaturas y gases en el interior de la galería basándose en todos los datos recabados, discretos y continuos. Este modelo ha sido dividido en dos debido a las grandes diferencias entre el periodo frío y cálido (Figura 6.8).

Cuando  $T_e < T_m$ , el aire del exterior es más frío y denso que el del interior de la galería, el cual está ligeramente más caliente y es menos denso. Bajo estas condiciones el proceso de ventilación natural se activa [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Gregorič et al., 2011] (Figura 6.8a). Por tanto, el aire atmosférico entra en la galería diluyendo la atmósfera interna y reduciendo la concentración de ambos gases a sus niveles base en todas las estaciones [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Gregorič et al., 2011].

Si bien la concentración de  $\text{CO}_2$  mostró prácticamente el mismo valor base en todas las estaciones (Figura 6.4d), ese no fue el caso del  $^{222}\text{Rn}$ , el cual exhibió un claro cambio entre las estaciones ST01 y ST02 (Figura 6.4e). Esta diferencia podría estar relacionada con un cambio en la petrología de la galería [Farrujia, 1989], entre los 1000 y 1600 m. Quizás, un incremento en el contenido de uranio de las rocas a esa profundidad, como varios autores han reportado para el flanco oeste de Pico Viejo [Oversby et al., 1971, Neumann et al., 1999], podría explicar este cambio en el nivel base del  $^{222}\text{Rn}$ .

El comportamiento de las temperaturas sugiere una transferencia de calor hacia el interior de la galería. Ambas temperaturas,  $T_a$  y  $T_s$ , en las estaciones ST01 y ST02 mostraban un decremento debido al aire frío que procedía del exterior. Cuando esta masa de aire atravesaba el PMT (2000 m), sufría un calentamiento, que al continuar su camino hacia el frente hacía que las temperaturas en ST03 y ST04 aumentaran (Figuras 6.5a, b). Por tanto, se podría afirmar que la existencia de una pequeña transferencia de calor pudiera explicar el ascenso de las temperaturas en las estaciones más profundas (Figura 6.8a).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

91 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

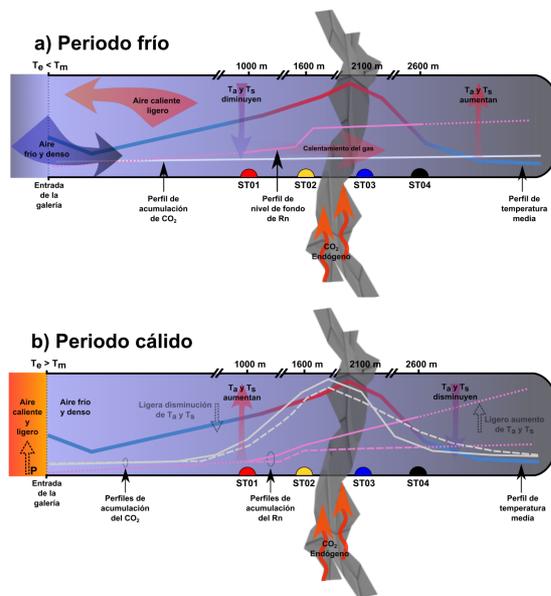


Figura 6.8: Modelo de la distribución de temperaturas y dinámica del gas (no a escala) para el periodo frío (a) y periodo cálido (b). Se incluyen los perfiles medios de temperatura, dióxido de carbono (línea blanca) y  $^{222}Rn$  (línea violeta).

Cuando  $T_e > T_m$ , el aire externo de la galería es más caliente y ligero que el del interior. En estas condiciones, la ventilación natural es cancelada [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Gregorič et al., 2011, Perrier and Richon, 2010] (Figura 6.8b). En ausencia del flujo de aire exterior, la transferencia de calor al frente de la galería también es cancelada. De este modo, las temperaturas en ST03 y ST04 disminuyen como consecuencia de un proceso natural de enfriamiento, y en ST01 y ST02 se produce un incremento de ambas temperaturas siguiendo la tendencia estacional de la  $T_e$ . Estas tendencias son confirmadas por correlaciones positivas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 6.1. TEMPERATURE AND GASEOUS EMISSION

93

en ST01 y ST02 y negativas en ST03 y ST04 con respecto a  $T_e - T_m$  (Tabla 6.3).

Debido a la contribución continua de gas de origen profundo, relativamente rica en  $\text{CO}_2$ , y la ausencia de ventilación natural, un proceso de acumulación tuvo lugar durante el periodo cálido en el interior de la galería [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Gregorič et al., 2011]. En todas las estaciones, la concentración de  $\text{CO}_2$  mostró correlaciones positivas con respecto a la diferencia  $T_e - T_m$  (Tabla 6.3). Como se ha indicado, la acumulación de  $\text{CO}_2$  fue modelada durante este periodo [Perrier and Richon, 2010] y los mayores tiempos característicos,  $\beta$  (Tabla 6.4), correspondieron a las estaciones ST02 y ST03. Un parámetro más importante aún es  $\Phi$ , el cual da una idea de la tasa de emisión. Los mayores valores están asociadas a ST02 y ST03, sugiriendo que el área con mayor emisión de  $\text{CO}_2$  se encontraba entre estas dos estaciones.

Existió una gran diferencia entre los perfiles de acumulación del  $\text{CO}_2$  y el  $^{222}\text{Rn}$  (Figura 6.6d, e). Para el caso del  $^{222}\text{Rn}$  se emplearon los datos de las estaciones. El patrón de acumulación del dióxido de carbono a lo largo de la galería, con su máximo localizado entre las estaciones ST02 y ST03, puede explicarse por la presencia del PMT (Figura 6.2). En cambio, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  no mostró un claro máximo absoluto, al menos en la sección de la galería cubierta por las estaciones. Probablemente, la emisión del  $^{222}\text{Rn}$  estuviera relacionada con un proceso difuso a lo largo de la galería, aparentemente no relacionado con la emisión de  $\text{CO}_2$  [Martin-Luis et al., 2015] y debido a un más que probable cambio estructural entre los 1000 y 1600 m como sugiere la descripción geológica de la galería [Farrujia, 1989].

Durante el periodo cálido, y en los cortos periodos de acumulación en los periodos fríos, se observó una influencia de la presión atmosférica (movimiento advectivo). En estos periodos, el proceso natural de ventilación estaba cancelado [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Perrier and Richon, 2010, Gregorič et al., 2011], y bajo estas condiciones se puede asumir que el aire dentro de la galería permanecía aislado del exterior. Este movimiento advectivo tuvo un periodo semidiurno predominante (presión atmosférica) como se observa en su contenido frecuencial, siendo más marcado en el  $\text{CO}_2$  y  $^{222}\text{Rn}$  (Figura 6.7). Cuando la presión externa aumentaba de forma continua, se generaba un movimiento advectivo [Pinault and Baubron, 1997, Massman, 2006, Perrier and Girault, 2013, Perrier and Le Mouél, 2016] que era capaz de empujar el gas hacia el frente de la galería. Por tanto, un aire con menor temperatura y menores concentraciones de dióxido de carbono y  $^{222}\text{Rn}$  proveniente del inicio de la galería alcanzaba las estaciones ST01 y ST02. Como consecuencia, tanto la  $T_a$  como la  $T_s$  así como las concentraciones de ambos gases disminuían (correlación negativa), estos dos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

93 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

últimos debido a un proceso de dilución [Kowalski and Sánchez-Cañete, 2010]. En ST03, la concentración de CO<sub>2</sub> también decrecía debido a que ST02 generalmente mostraba una menor concentración. En cambio, ambas temperaturas en ST03 aumentaban debido a la transferencia de calor del gas que atravesaba el PMT. La estación más profunda, ST04, también evidenciaba un ligero incremento de la temperatura debido al mismo proceso de transferencia de calor, al igual que en concentración de CO<sub>2</sub>.

En cuanto al <sup>222</sup>Rn, todas las estaciones mostraron un descenso de la concentración al aumentar la presión atmosférica. Los valores en ST02, ST03 y ST04 cayeron a valores similares (Figura 6.8b). Cuando el gas del interior era desplazado hacia el frente, cada estación recibía una masa de gas con menor concentración de <sup>222</sup>Rn procedente de zonas más externas de la galería. La diferencia hallada entre ST01 y el resto de estaciones pudo estar ligada a un cambio en la litología descrita en la galería entre los 1000 y 1600 m, como se ha mencionado.

Cuando la presión atmosférica disminuía, el gas del interior de la galería no podía desplazarse libremente al exterior debido al tapón térmico de la entrada,  $T_e > T_m$  [Milanolo and Gabrovšek, 2009, Kowalski and Sánchez-Cañete, 2010]. Por lo tanto, se puede afirmar que un movimiento advectivo hacia el exterior era débil o prácticamente nulo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.2. Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption

### 6.2.1. Contexto geológico

El Hierro es la isla más sudoccidental y pequeña (268 km<sup>2</sup>) de Canarias (Figura 6.9). También es la isla más joven del archipiélago puesto que los materiales subaéreos más antiguos están datados en 1.12 Ma [Troll and Carracedo, 2016a].

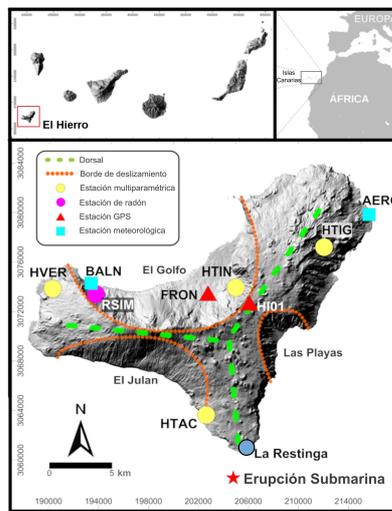


Figura 6.9: Red geoquímica en la isla de El Hierro: estaciones multiparamétricas en galerías (círculos amarillos) y estación de <sup>222</sup>Rn en pozo (círculo magenta). Las estaciones GNSS, HI01 y FRON, se representan con triángulos rojos. Se incluyen las estaciones meteorológicas pertenecientes al AEMET, BALN y AERO (cuadrados azules). Se han destacado las principales estructuras geológicas: deslizamientos gravitacionales (líneas discontinuas de color naranja) y dorsales (líneas discontinuas de color verde).

La parte subaérea se divide en dos edificios volcánicos bien diferenciados: Tifor (1.12 - 0.88 Ma) [Troll and Carracedo, 2016b,a] situado en el flanco noreste

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

de la isla, y El Golfo (545 - 176 ka) en el flanco oeste. Al menos tres grandes deslizamientos gravitacionales han tenido lugar durante la formación de la isla modificando drásticamente su morfología [Gee et al., 2001, Carracedo et al., 2001, Münn et al., 2006, Becerril et al., 2016] (Figura 6.9), siendo el más reciente el de El Golfo (15-13 ka) [Masson, 1996].

La actividad volcánica reciente está caracterizada por erupciones monogénicas de carácter efusivo y composición básica [Carracedo et al., 2001, Troll and Carracedo, 2016a, Becerril et al., 2016]. Esta actividad ha producido una gran cantidad de conos de cinder, principalmente a lo largo de las dorsales, así como en sus prolongaciones submarinas. La erupción datada más reciente corresponde a la de Lomo Negro entre 115 BCE y 1602 CE [Villasante-Marcos and Pavón-Carrasco, 2014].

#### Erupción submarina

El 19 de julio de 2011 la red sísmica del IGN en El Hierro detectó un claro incremento de la sismicidad. Esta se localizó en la zona de El Golfo, al norte de la isla, entre los 8 y 12 km de profundidad [López et al., 2012] hasta principios de septiembre. En el mismo periodo, se detectaron incrementos en la emisión de gases y deformación del terreno [López et al., 2012, Pérez et al., 2012, Prates et al., 2013].

Durante la segunda quincena de septiembre se produjo una clara migración al sur de la sismicidad acompañada de un aumento de la magnitud [López et al., 2012, Ibáñez et al., 2012]. El 8 de octubre de 2011, un evento sísmico de magnitud M4.4 fue registrado a 2 km de la costa sur [del Fresno et al., 2014], y 36 horas después se detectó una fuerte señal de tremor. La erupción había comenzado, y fue confirmada mediante observaciones visuales el 12 de octubre a 2 km al sur de La Restinga (Figura 6.9).

En los últimos días de ese mismo mes hubo un incremento en el número de eventos sísmicos, así como en la magnitud de los mismos. El 8 de noviembre se registró un evento de magnitud M4.6, el más energético de todo el proceso volcánico. La mayor parte de esta nueva sismicidad fue localizada en el área de El Golfo [Ibáñez et al., 2012, Tárraga et al., 2014].

En los siguientes meses la sismicidad, número de eventos y magnitud, así como la amplitud del tremor fueron decreciendo gradualmente. La señal de este último se desvaneció completamente el 17 de febrero de 2012. Durante la fase eruptiva no se registró una deformación significativa pero sí incrementos en la emisión gaseosa [Padilla et al., 2013, Padrón et al., 2013, Melián et al., 2014]. El

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.2. GEOCHEMICAL SIGNALS

97

5 de marzo de 2012, el comité científico dio por concluida la erupción submarina [Gobierno de Canarias, 2012].

6.2.2. Red de vigilancia

La red de vigilancia geoquímica desplegada antes y durante la erupción submarina de 2011 se muestra en la Figura 6.9.

Las estaciones HTIN y HVER registraron la temperatura del aire y suelo así como la concentración de CO<sub>2</sub> y de <sup>222</sup>Rn en el aire de cada galería a 400 m de profundidad (Figura 6.10a). En cambio, la estación HTIG midió los mismos parámetros salvo la concentración de CO<sub>2</sub>. Esta estación fue trasladada al sur y renombrada como HTAC cuando la sismicidad migró a esa parte de la isla a mediados de septiembre de 2011.

La estación RSIM registró la concentración de <sup>222</sup>Rn, en cuentas por minuto (cpm), en un pozo de 25 m de profundidad. El monitor de <sup>222</sup>Rn se situó a una profundidad de 23 m, a unos 4 m de la tabla de agua (Figura 6.10b).

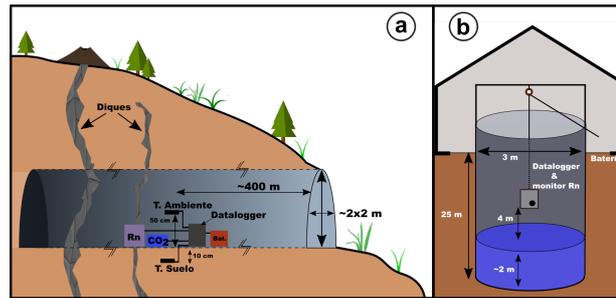


Figura 6.10: Esquemas (no a escala) de una estación multiparamétrica para la medida de las temperaturas y concentraciones de gases en el interior de una galería (a) y de la estación para la medida de la concentración de <sup>222</sup>Rn en el pozo (b).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

97 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 6.2.3. Resultados

Solo se identificaron variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en HTIN y <sup>222</sup>Rn en RSIM relacionadas con la actividad volcánica antes y durante la erupción submarina.

Durante el primer día de registro en HTIN, la concentración de dióxido de carbono se mantuvo alrededor de las 825 ± 19 ppm, los valores más bajos de todo el registro. Hasta el 7 de septiembre se observó un ligero incremento en la concentración (8 ppm/d), llegando ese día a las 1170 ± 23 ppm (Figura 6.11).

El 7 de septiembre se produjo un abrupto incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN, 100 ± 12 ppm en un solo día (Figura 6.11). En la misma fecha, en RSIM también se detectó un cambio en el nivel base de la concentración de <sup>222</sup>Rn de alrededor de 10 ± 4 cpm, casi un 50% de aumento, el cual se mantuvo hasta varios días antes de la finalización de la erupción (Figura 6.11).

Después de este abrupto incremento en HTIN, la concentración de CO<sub>2</sub> continuó aumentando rápidamente (16 ppm/d) hasta el inicio de la erupción el 10 de octubre, pasando de 1170 ± 23 a 1720 ± 29 ppm (47% de aumento). Durante el mismo periodo, la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM mostró diferentes picos de actividad:

- I. Del 23 al 24 de septiembre se alcanzaron las 45 ± 4 cpm (50% de incremento).
- II. El 27 de septiembre se registraron 69 ± 4 cpm (115% de aumento).
- III. El 3 de octubre hubo un brusco aumento alcanzándose las 74 ± 4 cpm (114% de incremento).

Tras el inicio de la erupción, la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN continuó aumentando, pero esta vez más lentamente (4 ppm/d) hasta el 2 de enero de 2012, momento en el que se produjo un incremento en el ritmo de crecimiento (9 ppm/d) alcanzando las 2160 ± 34 ppm. Después del 15 de enero y hasta el final del proceso eruptivo, la concentración de dióxido de carbono en HTIN se mantuvo constante alrededor de 2200 ± 34 ppm.

En RSIM, desde el inicio de la erupción y hasta el 22 de noviembre, el nivel base de la concentración de <sup>222</sup>Rn se mantuvo estable con varios picos entre el 3 y 7 de noviembre. El mayor de ellos alcanzó las 110 ± 4 cpm el 4 de noviembre

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.2. GEOCHEMICAL SIGNALS

99

(233% de aumento). El 22 de noviembre, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  mostró un drástico incremento en el nivel base alcanzando las  $90 \pm 4$  cpm, y hasta el 1 de diciembre mostró una relativa estabilidad para luego describir un descenso paulatino hasta mediados de enero de 2012 cuando volvió a aumentar hasta las  $88 \pm 4$  cpm.

Entre el 22 de enero y el 8 febrero se produjo un mal funcionamiento del equipo y tras reemplazarlo, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  se mantuvo en valores base similares a los registrados durante los primeros días de registro.

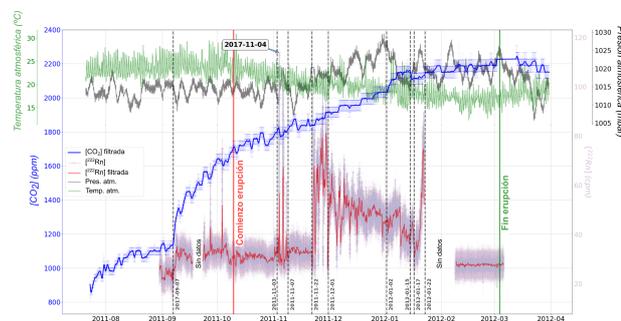


Figura 6.11: Evolución temporal de la concentración de  $\text{CO}_2$  en HTIN (azul) y  $^{222}\text{Rn}$  en RSIM (violeta). El filtrado de ambos registros mediante un filtro Butterworth paso bajo zero *phase* se superpone, en azul oscuro para el  $\text{CO}_2$  y rojo para el  $^{222}\text{Rn}$ . También se incluyen la presión atmosférica registrada en la estación AERO (línea gris) así como la temperatura atmosférica medida en la estación BALN (verde).

6.2.4. Discusión y conclusiones

Una vez que las variaciones de  $\text{CO}_2$  y  $^{222}\text{Rn}$  en HTIN y RSIM fueron identificadas y cuantificadas, ambos registros se dividieron en cinco fases entre julio de 2011 y marzo de 2012. Esta división se basa en la identificación de los principales cambios de la energía sísmica acumulada y deformación del terreno.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

99 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

**Fase A: 18/07/2011 - 07/09/2011**

La deformación del terreno mostró una clara tendencia de aumento el 18 de julio de 2011. Todas las estaciones GNSS comenzaron a moverse hacia el norte y además, FRON y HI01 mostraron un claro movimiento al este [López et al., 2012]. La sismicidad se localizó inicialmente en la parte norte de la isla, y su patrón era compatible con una intrusión magmática somera [González et al., 2013, Martí et al., 2013a]. La desgasificación de este cuerpo magmático podría explicar el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire en HTIN (Figura 6.12). Ese incremento en la desgasificación de dióxido de carbono fue registrado por otros autores [López et al., 2012, Melián et al., 2014].

La desaceleración en el aumento de la concentración CO<sub>2</sub> a partir de mediados de agosto pudo estar relacionada con un descenso generalizado en la emisión difusa como apuntan Melián et al. [2014].

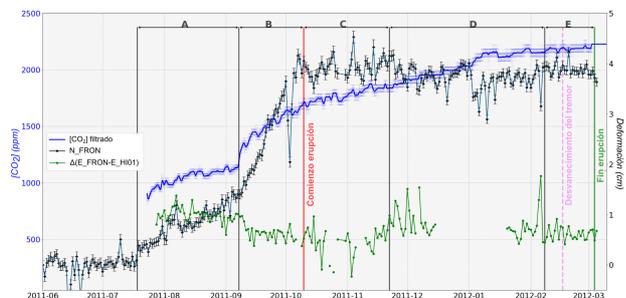


Figura 6.12: Evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN (azul) junto con la misma señal filtrada (línea azul oscuro). También se incluye la evolución de la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la diferencia entre la componente este de esta estación y HI01 (línea verde). Las fases definidas se señalan en la parte superior con las letras A-E.

**Fase B: 07/09/2011 - 10/10/2011**

Durante la primera quincena de septiembre, la sismicidad comenzó su migración al sur y la deformación del terreno se aceleró el día 9 [López et al., 2012, Ibáñez et al., 2012, Prates et al., 2013]. El brusco incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN el 7 de septiembre (Figura 6.12) coincide temporalmente con el aumento en la tasa de deformación. La red GNSS del IGN y la estación FRON mostraron un claro movimiento al norte [López et al., 2012] (Figura 6.12), a lo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilár  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## 6.2. GEOCHEMICAL SIGNALS

101

hay que añadir la diferencia en la velocidad de desplazamiento de la componente este entre FRON y HI01 (línea verde en Figura 6.12). En la estación HI01 se observó un desplazamiento hacia el este más rápido que el registrado en FRON. Esta diferencia pudo facilitar la apertura de fracturas y/o fisuras localizadas entre ambas estaciones (Figura 6.9), permitiendo una desgasificación más eficiente. El incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN coincidió también con un incremento en la tasa de emisión del dióxido de carbono en todo el edificio volcánico [Melían et al., 2014].

Otra posible consecuencia del cambio en la velocidad de deformación fue el incremento del nivel base de la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM (Figura 6.13). El aumento del estrés tectónico pudo ser el causante de la liberación de una gran cantidad de <sup>222</sup>Rn [Delfa et al., 2008, Tuccimei et al., 2010, Mollo et al., 2011].

A partir de mediados de septiembre, algunos autores sugieren una rápida migración del magma a profundidades más someras en el centro de la isla [González et al., 2013, Martí et al., 2013b], y Meletlidis et al. [2015] determinaron el mayor volumen para el magma acumulado durante este periodo. La liberación de CO<sub>2</sub> de este cuerpo magmático somero, junto con la fracturación sufrida por la corteza, podrían explicar por qué la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN mostró su mayor velocidad de crecimiento. Esto coincide con los aumentos reportados por Pérez et al. [2012] en el flujo difuso del dióxido de carbono así como en la emisión difusa de helio [Padrón et al., 2013].

Debido a la falta de datos, es difícil asegurar si el aumento registrado el 24 de septiembre en RSIM (recuadro 1, Figura 6.13) pudo estar relacionado con un cambio en la energía sísmica liberada a mediados de ese mismo mes [López et al., 2012] o al brusco incremento en la deformación del terreno [López et al., 2012, Prates et al., 2013] (Figura 6.13).

El 27 de septiembre se produjo un nuevo aumento en RSIM (recuadro 2, Figura 6.13), que coincidió con una clara aceleración en la liberación de la energía sísmica [López et al., 2012]. Teniendo en cuenta los resultados reportados por Delfa et al. [2008], Tuccimei et al. [2010], Mollo et al. [2011], Scarlato et al. [2013] y Nicolas et al. [2014], es muy factible suponer que este aumento pudo deberse a la microfracturación de la roca asociada a la sismicidad, la cual facilitaría la liberación de <sup>222</sup>Rn.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

101 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Figura 6.13: Evolución temporal de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en RSIM (violeta) antes del inicio de la erupción junto a la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la energía sísmica liberada acumulada (naranja). La señal filtrada del  $^{222}\text{Rn}$  (rojo) se superpone al registro en RSIM. Los recuadros con márgenes discontinuos resaltan las principales variaciones identificadas en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ . Las fases definidas durante este periodo se indican en la parte superior con las letras A y B.

El último brusco incremento en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  previo al inicio de la erupción tuvo lugar el día 3 de octubre (recuadro 3 en la Figura 6.13). Este coincide temporalmente con un punto de inflexión en la energía sísmica acumulada, y con un proceso de inflación-deflación en la deformación [López et al., 2012, Prates et al., 2013]. De nuevo, este incremento anómalo en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en RSIM puede interpretarse como un efecto colateral del estrés cortical, incrementando la microfracturación y la consiguiente liberación de  $^{222}\text{Rn}$  [Delfa et al., 2008, Tuccimei et al., 2010, Mollo et al., 2011, Scarlato et al., 2013, Nicolas et al., 2014].

El 6 de octubre el nivel base de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  mostró un ligero descenso, coincidiendo con el parón en la deformación (recuadro 4, Figura 6.13). En las mismas fechas, Meletlidis et al. [2015] informaron de un movimiento al sur de la fuente origen de la deformación. Una reducción en la liberación de  $^{222}\text{Rn}$  de la roca circundante en RSIM, debida a una relajación del estrés tectónico, puede explicar el descenso del nivel base. Padilla et al. [2013] también registraron un abrupto descenso en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  durante las mismas fechas.

**Fase C: 10/10/2011 - 22/11/2011**

Una vez que la erupción comenzó, era esperable una disminución en la emisión de  $\text{CO}_2$  debido a una reducción de la sobrepresión [Liuzzo et al., 2013]. La

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.2. GEOCHEMICAL SIGNALS

103

diferencia entre las componentes este de FRON y HI01 regresó a valores pre-eruptivos y por tanto, las fracturas y/o fisuras que permitieron el ascenso de los gases magmáticos en la fase anterior pudieron sellarse parcialmente. El ritmo en el incremento de la concentración de dióxido de carbono en HTIN disminuyó con respecto a la fase anterior. Pérez et al. [2012] también registraron un decremento en la emisión difusa de CO<sub>2</sub> tras el inicio de la erupción.

En los primeros días de noviembre, se registraron diferentes picos en la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM (Figura 6.14) coincidiendo con eventos sísmicos muy energéticos. Tárraga et al. [2014] detectaron un incremento en la amplitud del tremor así como episodios de máxima desgasificación en esas fechas. Estos abruptos incrementos en RSIM podrían relacionarse con la microfacturación previa, como ocurrió en la fase B (Figura 6.12). Sin embargo, estos picos en la concentración de <sup>222</sup>Rn también pudieron estar relacionados con una fuente de gas profunda [Martí et al., 2013b, Longpré et al., 2014] o como combinación de otros dos fenómenos: la liberación de <sup>222</sup>Rn en nuevas fracturas y el aumento de la emisión de CO<sub>2</sub> [Melián et al., 2014] actuando este como gas portador [Neri et al., 2016].

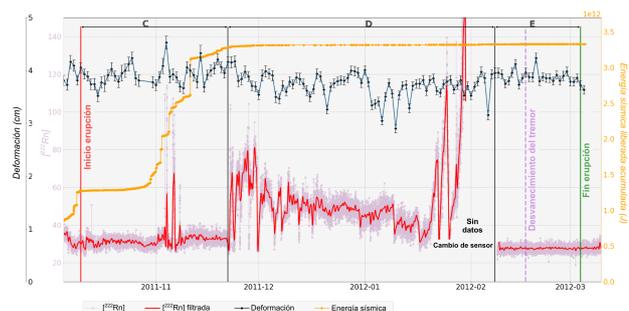


Figura 6.14: Evolución temporal de la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM (violeta) durante el periodo eruptivo junto a la componente norte de la estación FRON (línea negra) y la energía sísmica liberada acumulada (naranja). La señal filtrada del <sup>222</sup>Rn (rojo) se superpone al registro en RSIM. Las fases definidas durante este periodo se indican en la parte superior con las letras C, D y E.

**Fase D: 22/11/2011 - 08/02/2012**

Al comienzo de esta fase, la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM mostró un incremento significativo (Figura 6.14). Este nuevo aumento pudo deberse a la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

103 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

desgasificación de un nuevo aporte de magma [Longpré et al., 2014, Martí et al., 2013a]. En esos días, Melián et al. [2014] registraron las más altas tasas de emisión de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, el brusco aumento en RSIM pudo estar relacionado con una contribución de gas profunda, donde el CO<sub>2</sub> actuó como gas portador [Neri et al., 2016]. Padilla et al. [2013] sugirieron el mismo mecanismo para explicar el incremento detectado en el ratio <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn.

Tárraga et al. [2014] informaron de un decrecimiento en el valor medio de la amplitud del tremor a partir del 20 de noviembre. El 1 de diciembre, la concentración de <sup>222</sup>Rn mostró una ligera tendencia a la disminución. Esto fue compatible con una caída en el ratio <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn [Padilla et al., 2013] y disminución de la emisión total de CO<sub>2</sub> [Melián et al., 2014].

Hasta los primeros días de enero de 2012, la concentración de CO<sub>2</sub> en HTIN continuó mostrando un crecimiento constante (Figura 6.11). Al mismo tiempo, la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM decreció lentamente (Figura 6.14). Tárraga et al. [2014] informaron de un aumento en la amplitud del tremor alcanzando su máximo el 20 de enero de 2012. Los autores de ese trabajo atribuyeron este incremento de la amplitud a cambios en la viscosidad del magma relacionados posiblemente con pequeños aportes de material fresco de tipo básico [Martí et al., 2013b, González et al., 2013]. Estos nuevos aportes de magma se podrían ver reflejados en un pequeño incremento en la emisión gaseosa. Esta explicación es coherente con los datos recabados en HTIN y RSIM, así como con el incremento en el <sup>222</sup>Rn y en el ratio <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn medidos por Padilla et al. [2013] y en la emisión difusa reportada por Melián et al. [2014].

Durante la segunda quincena de enero se produjo un claro incremento en la concentración de <sup>222</sup>Rn (Figura 6.14). En ese periodo de tiempo, la señal del tremor se caracterizó por pulsaciones y oscilaciones que Tárraga et al. [2014] asociaron con una fuerte pero discontinua desgasificación magmática. Padilla et al. [2013] registraron un incremento en la concentración de <sup>222</sup>Rn en el suelo a la vez que un aumento del ratio <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn. Melián et al. [2014] reportaron un ligero aumento en la tasa total de emisión difusa de CO<sub>2</sub> el 15 de enero. Así, la explicación más probable para el incremento de la concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM es la de una fuente de gas de origen profunda.

#### Fase E: 08/02/2012 - 05/03/2012

La concentración de <sup>222</sup>Rn en RSIM retornó a valores similares a los registrados durante la fase A (Figura 6.13). Basándose en los resultados reportados por Padilla et al. [2013], la vuelta de la concentración de <sup>222</sup>Rn a esos valores base fue

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.2. GEOCHEMICAL SIGNALS

105

probablemente real y no debido a un cambio en la instrumentación de la estación.

En HTIN, la concentración del dióxido de carbono permaneció prácticamente constante desde los primeros días de febrero. Muy probablemente debido a la estabilización en la emisión de CO<sub>2</sub> como informaron Melián et al. [2014].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

105 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 6.3. Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands

#### 6.3.1. Contexto geológico

La Palma está localizada en el noroeste del archipiélago canario. Su geología puede dividirse en tres grandes unidades [Hausen, 1969] (Figura 6.15a):

- I. Antiguo complejo basal (ca. 4.0 a 3.0 Ma).
- II. Antiguas series volcánicas (ca. 1.8 a 0.5 Ma): volcán Garafía, Taburinet, Bejenado y Cumbre Nueva.
- III. Cumbre Vieja (últimos 125 ka).

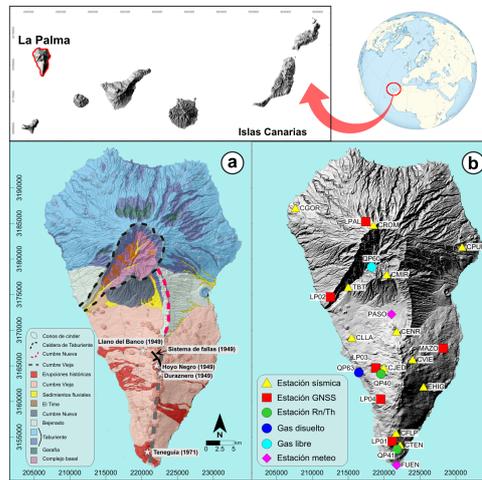


Figura 6.15: Localización de La Palma. Mapa geológico simplificado (a) destacando la Caldera de Taburiente, Cumbre Nueva, Cumbre Vieja, el sistema de fallas de la erupción de San Juan (1949) y las dos últimas erupciones históricas. (b) Red de vigilancia volcánica del IGN junto a dos estaciones meteorológicas pertenecientes al AEMET, PASO y FUEN.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

### 6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

107

La actividad subaérea comenzó hace 1.8 Ma en el norte de la isla con la construcción del edificio Garafía. Este volcán sufrió un colapso parcial hacia el suroeste hace 1.2 Ma [Ancochea et al., 1994] y en la depresión generada emergió el edificio Taburiente. Sus erupciones tuvieron un carácter félsico muy marcado, indicando una evolución magmática de basaltos a magmas más diferenciados y evolucionados [Troll and Carracedo, 2016c].

La actividad volcánica migró al sur durante las etapas más avanzadas en la formación del volcán Taburiente, culminando en la creación de Cumbre Nueva. Este nuevo edificio sufrió un gran deslizamiento de su flanco oeste hace 560 ka [Carracedo et al., 2001]. La depresión resultante, el Valle de Aridane, propició la formación de la Caldera de Taburiente. A continuación, el volcán Bejenado emergió en el espacio creado por el deslizamiento de Cumbre Nueva, y tras un periodo de inactividad, el volcanismo migró al sur hace unos 125 ka construyendo el edificio Cumbre Vieja.

En Cumbre Vieja, los conos eruptivos están localizados a lo largo de una dorsal de 20 km con dirección norte-sur y una altura máxima de 1950 m s.n.m. Todas las erupciones históricas de la isla han tenido lugar en ella [Romero Ruiz, 1989], siendo las dos últimas la de San Juan (1949) y la del Teneguía (1971) (Figura 6.15a).

En toda la isla existe un único punto con emisiones visibles localizado en el interior de la Caldera de Taburiente, Dos Aguas (QP60). Es un manantial (sondeo) frío, rico en CO<sub>2</sub> y con los valores más altos de la relación isotópica corregida del helio ((R/R<sub>s</sub>)<sub>c</sub>) de Canarias [Pérez, 1994, Hilton et al., 2000, Padrón et al., 2012, 2015]. Debido a que estos valores se encuentran por encima del rango característico del MORB [Graham, 2002], algunos autores han sugerido la existencia de una pequeña pero persistente componente de pluma mantélica [Day and Hilton, 2011, Padrón et al., 2015], lo cual apoyaría el modelo de punto caliente propuesto para el origen del archipiélago [Carracedo et al., 1998a].

#### 6.3.2. Red de vigilancia

La red de vigilancia volcánica desplegada por el IGN en La Palma se muestra en la Figura 6.15b.

##### Sismología

Inicialmente la red sísmica estaba formada por las estaciones: TBT, EHIG, CPUN, CJED y CTEN y en la primera quincena de octubre de 2017 se añadieron

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

107 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

107 / 229

108

CAPÍTULO 6. RESUMEN

CVIE, CENR, CROM, CGOR, CMIR, CLLA y CFLP (triángulos amarillos en la Figura 6.15b). Todas las estaciones disponían de sensores de banda ancha y 3C exceptuando a CVIE que es de corto periodo. Los datos eran transmitidos en tiempo real a la Red Sísmica Nacional del IGN (RSN) donde los eventos eran localizados.

#### Geoquímica

La red de geoquímica incluyó tanto puntos de muestreo de gases libres y disueltos, QP60 y QP63 respectivamente, como dos estaciones para el registro en continuo de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$  en el suelo, QP40 y QP41 (Figura 6.15b).

#### Geodesia

La red inicial GNSS consistió en cinco estaciones con receptores de doble frecuencia: LPAL, LP01, LP02, LP03, LP04 y MAZO (Figura 6.15b). Salvo esta última estación [GRAFCAN, 2019] todas pertenecían al IGN. Los datos eran transmitidos en tiempo real para cuantificar diariamente la deformación del terreno corrigiendo el movimiento de placa.

### 6.3.3. Resultados

#### i) Sismicidad

##### Actividad sísmica previa

Hasta mayo de 2017, el IGN tenía desplegadas en la isla dos estaciones sísmicas, TBT y EHIG, con las que se localizaron siete eventos entre el 1 de agosto de 2005 y el 1 de octubre de 2017 [IGN, 2019].

##### Primer enjambre

En la primera quincena de octubre de 2017, la RSN localizó 128 pequeños terremotos (Figura 6.16a) presentando una profundidad media de  $21.2 \pm 2.9$  km. El máximo número de eventos se registró el día 8 con un 46 % del total.

La relocalización de esta serie se muestra en la Figura 6.17a. De los 124 eventos iniciales, 116 fueron relocalizados con éxito, los cuales cubren una gran zona, predominantemente al oeste de la dorsal de Cumbre Vieja, sin mostrar algún tipo de alineamiento espacial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

108 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

109

Las magnitudes de los eventos oscilaron entre 0.9 y 2.7 mbLg, mientras que la energía sísmica liberada durante este periodo fue de  $2.88 \cdot 10^9$  J. El 78 % de esta fue liberada entre el 7 y 9 de octubre (Figura 6.16b).

La estimación de la magnitud de completitud,  $M_c$ , fue muy estable en este enjambre, 1.4 mbLg, pero no fue el caso del valor de b (panel superior Figura 6.16e). Esto, muy probablemente, esté relacionado con el bajo número de eventos registrados [Nava et al., 2017] y el método empleado. Con el fin de obtener una estimación del valor de b lo más cercano al real se optó por determinar el valor medio y el error estándar a partir de los resultados de los tres métodos. De esta forma, el valor de b asignado a este enjambre fue de  $1.6 \pm 0.1$ .

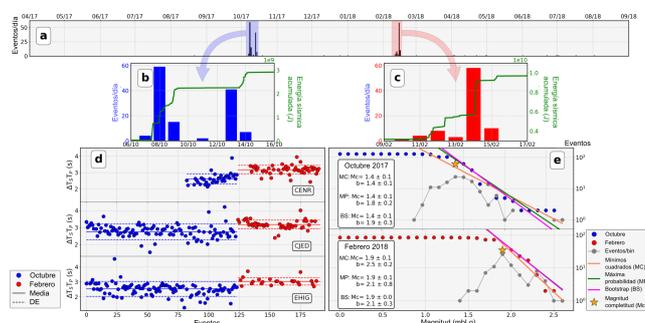


Figura 6.16: Datos sísmicos: histograma de eventos desde abril de 2017 a septiembre de 2018 (a) donde los enjambres de octubre de 2017 (azul) y febrero de 2018 (rojo) están resaltados; histograma en detalle de ambos enjambres (b y c) incluyendo la energía sísmica acumulada (línea verde); diferencia de tiempos entre las fases P y S para cada evento en cada uno de los enjambres en las estaciones sísmicas más cercanas (d), y la estimación de la  $M_c$  y el valor de b para cada enjambre (e).

Segundo enjambre

Entre el 11 y el 15 de febrero de 2018 se detectaron y localizaron al menos 84 eventos (Figura 6.16c). La magnitud osciló entre 1.4 y 2.5 mbLg, siendo la energía sísmica liberada de unos  $6.68 \cdot 10^9$  J, el doble que en la primera serie. Es importante destacar que el 14 de febrero se localizaron el 69 % de los eventos lo que equivale a un 53 % del total de energía sísmica liberada.

El error en la estimación del valor de b fue mayor que para el primer enjambre, lo que está directamente relacionado con el bajo número de eventos [Bender,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

109 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

1983]. Siguiendo la misma metodología que en la primera serie, la estimación del valor de  $b$  y su error fue de  $2.3 \pm 0.2$  (panel inferior de la Figura 6.16e). El valor de  $M_c$  fue de  $1.9 \pm 0.1$ . Ambos resultados, valor de  $b$  y  $M_c$ , fueron claramente superiores a los obtenidos en la primera serie.

El valor medio de la profundidad fue de  $26.4 \pm 2.3$  km, ligeramente más profundo que el primer enjambre. Este resultado es compatible con la diferencia de tiempos entre las fases P y S,  $\Delta T_S T_P$  (Figura 6.16d). La relocalización conjunta de ambas series (Figura 6.17c) también confirma este hecho.

En la Figura 6.17b se muestran los eventos relocalizados para esta serie, donde de 80 eventos de los 84 iniciales fueron relocalizados con éxito. A diferencia de la primera serie (círculos azules en la Figura 6.17a), en el segundo enjambre tanto los eventos sin relocalizar como los relocalizados se concentraron principalmente bajo la dorsal de Cumbre Vieja y en su flanco este (Figura 6.17b).

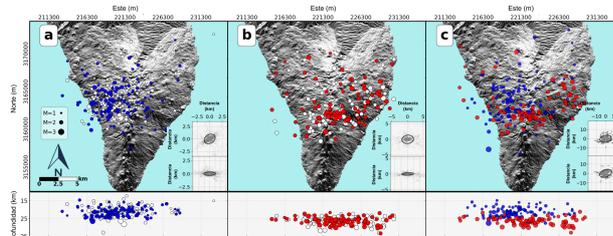


Figura 6.17: Relocalización de la sismicidad empleando el programa *hypoDD*. En los paneles (a) y (b) los círculos blancos representan la localización inicial mientras que los círculos azules y rojos marcan la relocalización de las series de octubre de 2017 y febrero de 2018 respectivamente. En el panel (c) se muestra la relocalización conjunta de ambos enjambres. En cada uno de los paneles, esquina inferior derecha, se muestra el error estimado para cada una de las relocalizaciones.

A partir de la comparación de los eventos relocalizados en ambos enjambres (Figuras 6.17a y b) parece intuirse una ligera migración hacia el este de la sismicidad. Para confirmar este hecho, ambas series fueron relocalizadas conjuntamente (Figura 6.17c). Debido a que el programa *hypoDD* determina la relocalización relativa, y ambos enjambres fueron considerados conjuntamente, es posible afirmar que la primera serie se produjo al oeste de la segunda.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

111

ii) Geoquímica

Antes de octubre de 2017, la relación isotópica del helio corregida [Sakamoto et al., 1992],  $(R/R_a)_c$ , mostró un ligero decremento en QP60 partiendo de un valor de  $9.95 \pm 0.07$  en septiembre de 2016 a  $9.16 \pm 0.07$  un año después (línea negra discontinua en la Figura 6.18a). Por el contrario, la  $(R/R_a)_c$  sufrió un lento incremento en el punto de muestreo QP63 alcanzando un valor de  $7.23 \pm 0.05$  en septiembre de 2017 (línea gris discontinua en la Figura 6.18a).

Tras el primer enjambre,  $(R/R_a)_c$  en QP60 evidenció una mayor variación en su evolución, oscilando entre valores de  $9.76 \pm 0.07$  y  $8.76 \pm 0.08$ . Mientras tanto, en QP63, la  $(R/R_a)_c$  alcanzó los dos valores más altos de su conjunto de datos,  $7.94 \pm 0.05$  tras el primer enjambre y  $8.23 \pm 0.12$  después del segundo. Tras la segunda serie cayó a valores por debajo de 7. Durante 2018 y principios de 2019, QP60 y QP63 presentaron tendencias similares (Figura 6.18a).

En la Figura 6.19a, los valores de  $R/R_a$  son representados frente al ratio  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  para QP60 y QP63. Debido a las diferencias en las características del punto de muestreo, las líneas de mezcla parten de puntos distintos y para un correcto ajuste se emplearon dos diferentes *end members* o términos finales.

Las muestras de QP60 tienen un valor claramente superior al rango típico del MORB, muy posiblemente ligado a una pequeña contribución de helio tipo pluma mantélica [Padrón et al., 2015]. En cambio, los valores de QP63 se ajustan correctamente para el valor estándar del MORB.

La contribución del helio radiogénico cortical ( $^4\text{He}_{\text{crust}}$ ) (Figura 6.18b) presentó mayores variaciones en QP60, alcanzando 1.3 ppm después del segundo enjambre. En QP63, la contribución del  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  fue mucho menor que en QP60, siendo solo notable en marzo de 2017.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

111 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

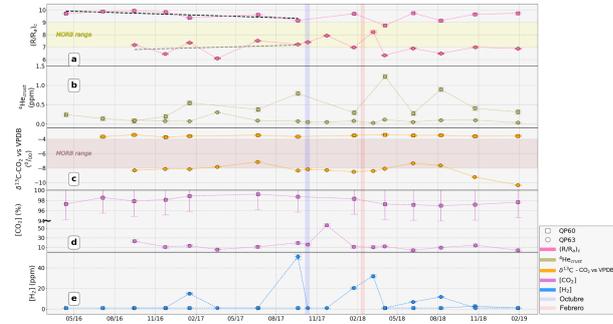


Figura 6.18: Registros de QP60 (cuadrados) y QP63 (círculos). De arriba a abajo: (a) relación isotópica del helio corregida,  $(R/R_s)_{He}$ , (b) estimación de la contribución del helio cortical,  $He_{cort}$ , (c) relación isotópica del carbono,  $\delta^{13}C-CO_2$  vs VPDB, (d) concentración de dióxido de carbono y (e) concentración de hidrógeno. Los enjambres de octubre de 2017 y febrero de 2018 se indican con dos barras verticales, una violeta y otra roja respectivamente.

La relación isotópica del carbono,  $\delta^{13}C-CO_2$  (Figura 6.18c), varió entre  $-3.4$  ‰ y  $-3.7$  ‰ en QP60, exhibiendo una clara estabilidad incluso durante la ocurrencia de los enjambres. En cambio, en QP63 se produjo un incremento durante 2017, alcanzando su máximo valor el 20 de junio de 2017,  $-7.1$  ‰. En el periodo entre enjambres,  $\delta^{13}C-CO_2$  en QP63 osciló entre  $-8.5$  ‰ y  $-8.2$  ‰. Tras el segundo, aumentó hasta un  $-7.3$  ‰ el 6 de junio de 2018 para luego decrecer de forma paulatina hasta un  $-10.3$  ‰.

En QP60 la concentración de dióxido de carbono (Figura 6.18d) se mantuvo estable entre el  $97 \pm 3$  ‰ y el  $99 \pm 3$  ‰. En cambio, en QP63 se registraron concentraciones más bajas fluctuando entre el  $5.4 \pm 3$  ‰ y el  $23.3 \pm 3$  ‰ antes de octubre de 2017. Tras el primer enjambre, la concentración de  $CO_2$  alcanzó su máximo valor,  $56.6 \pm 3$  ‰, 2.4 veces mayor que el máximo valor anterior. Durante 2018, la concentración de  $CO_2$  se mantuvo por debajo del 20 ‰ en el mismo punto de muestreo.

La concentración de  $H_2$  en QP60 (Figura 6.18e) se mantuvo por debajo o cerca del límite de detección, 1 ppm, durante todo su registro. Ese no fue el caso de QP63, donde en enero de 2017 se alcanzaron las  $15.0 \pm 0.8$  ppm, registrándose un máximo de  $50.8 \pm 2.5$  ppm días previos al primer enjambre. Antes y después del segundo enjambre se obtuvieron valores de  $20.5 \pm 1.0$  ppm y  $31.8$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

113

± 1.6 ppm respectivamente. En el verano de 2018 también se observó un claro incremento en la concentración de hidrógeno registrándose un valor de 11.7 ± 0.6 ppm el 8 de agosto de 2018.

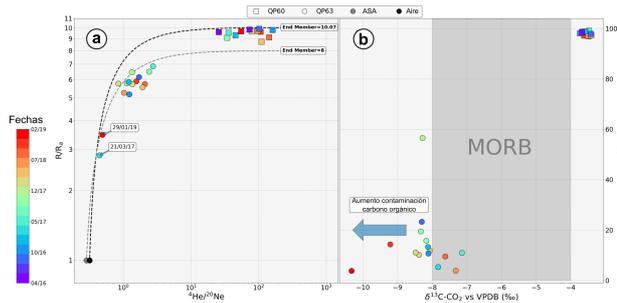


Figura 6.19: Relación isotópica del helio,  $R/R_a$ , frente al ratio  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  (a). Se han considerado dos líneas de mezcla distintas debido a las características de cada punto, por lo que ambas parten de dos puntos diferentes: Aire (QP60) y Aire Saturado en Agua, ASA (QP63). También se han establecido dos términos finales del manto (end members) para cada una de estas líneas de mezcla,  $10.04 \pm 0.07$  para QP60 [Padrón et al., 2015] y  $8 \pm 1$  para QP63 [Graham, 2002]. En el panel de la derecha (b) se muestra la concentración de dióxido de carbono frente al  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  vs VPDB. En ambos paneles los cuadrados representan las muestras tomadas en QP60 y los círculos las de QP63.

Durante octubre de 2017, el valor medio de la concentración  $^{222}\text{Rn}$  en QP40 fue de  $333 \pm 160 \text{ Bq/m}^3$  (media ± desviación estándar) (Figura 6.20a4). Tras un fallo de la instrumentación, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  mostró valores más altos ( $599 \pm 160 \text{ Bq/m}^3$ ) hasta julio de 2018. Entre julio y octubre de 2018 se observó una disminución en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ , fluctuando alrededor de un valor medio de  $427 \pm 209 \text{ Bq/m}^3$ . Tras este periodo, el  $^{222}\text{Rn}$  retornó a valores ligeramente superiores,  $741 \pm 168 \text{ Bq/m}^3$ .

En QP41, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  aumentó constantemente desde el comienzo del registro alcanzando un máximo de  $1185 \pm 53 \text{ Bq/m}^3$  a finales de febrero de 2018 (Figura 6.20b4). Tras un fallo del sistema, en junio de 2018 el  $^{222}\text{Rn}$  mostró abruptas variaciones y después se mantuvo en bajas concentraciones hasta octubre de 2018. A continuación, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  creció continuamente hasta llegar a los  $1440 \pm 59 \text{ Bq/m}^3$  el 16 de noviembre de 2018, para luego regresar a valores de fondo similares a los de diciembre de 2017. Desde esa fecha el  $^{222}\text{Rn}$  aumentó de forma constante hasta finales de 2018 y luego, se

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

113 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

mantuvo oscilando alrededor de un valor medio de  $660 \pm 247$  Bq/m<sup>3</sup>.

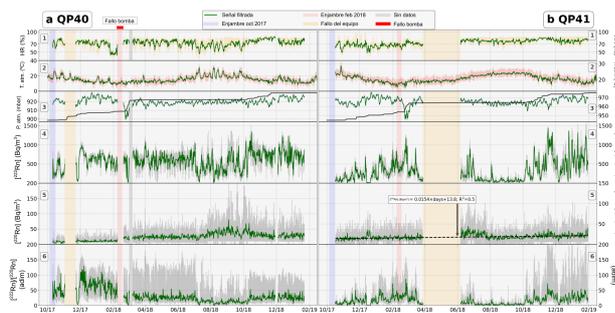


Figura 6.20: Registros de QP40 (a) y QP41 (b): humedad relativa (a1 y b1), temperatura atmosférica (a2 y b2), presión atmosférica y precipitación acumulada y normalizada (línea negra) (a3) y b3), concentración de <sup>222</sup>Rn en el suelo (a4 y b4), concentración de <sup>220</sup>Rn en el suelo (a5 y b5) y ratio entre <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn (a6 y b6). Los valores de temperatura atmosférica y precipitación fueron obtenidos de las estaciones del AEMET PASO para QP40 y FUEN para QP41 (rombos magenta en la Figura 6.15). Todos los registros fueron filtrados con un filtro Butterworth paso bajo *zero phase* y representados sobre los registros originales (líneas verdes). Los periodos de ambos enjambres se han resaltado con dos franjas verticales, una violeta para octubre de 2017 y otra roja para febrero de 2018.

La concentración de <sup>220</sup>Rn en QP40 (Figura 6.20a5) permaneció estable desde octubre de 2017 hasta comienzos de febrero de 2018 con un valor medio de  $15 \pm 10$  Bq/m<sup>3</sup>. Un valor medio claramente superior de  $28 \pm 15$  Bq/m<sup>3</sup> fue observado hasta julio de 2018, después de reemplazar el equipo de medida debido a un problema en la bomba en febrero de 2018. De agosto a octubre de 2018, la concentración de <sup>220</sup>Rn aumentó y se mantuvo estable en torno a los  $44 \pm 31$  Bq/m<sup>3</sup> para a continuación decrecer ligeramente hasta los  $40 \pm 21$  Bq/m<sup>3</sup>.

Para el caso de QP41, la concentración de <sup>220</sup>Rn (Figura 6.20b5) se mantuvo estable alrededor de los  $17 \pm 13$  Bq/m<sup>3</sup> desde el comienzo de la serie y hasta abril de 2018 con la excepción de un brusco incremento a mediados de diciembre de 2017 cuando se alcanzaron los  $34 \pm 9$  Bq/m<sup>3</sup>. Este aumento coincidió con un descenso en la concentración de <sup>222</sup>Rn en la misma estación. Durante junio y julio de 2018, la concentración de <sup>220</sup>Rn mostró valores más altos ( $27 \pm 18$  Bq/m<sup>3</sup>) hasta agosto, cuando sufrió un decremento a valores previos. A continuación, el <sup>220</sup>Rn exhibió un ligera tendencia de aumento desde un valor medio de  $16 \pm 11$  Bq/m<sup>3</sup> durante agosto de 2018 hasta  $26 \pm 16$  Bq/m<sup>3</sup> en enero de 2019. Con el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

115

fin de comprobar este aumento, la concentración de  $^{220}\text{Rn}$  filtrada (Butterworth paso bajo zero phase) en QP41 se ajustó linealmente. El resultado de este ajuste se incluye en la Figura 6.20b5 (línea negra discontinua).

iii) Geodesia

Las componentes de las estaciones GNSS (Figura 6.21) mostraron variaciones aleatorias por debajo del centímetro, y debido a su intrínseca menor precisión, estas fueron mayores en la componente vertical [Santerre, 1991].

En todo el periodo mostrado en la Figura 6.21 no es posible identificar una deformación atribuible a una actividad volcánica o asociada a los enjambres. Es cierto que existieron cortos periodos de tiempo donde las componentes GNSS mostraron abruptos cambios, pero siempre regresaron a valores previos. Por tanto, no se registró un desplazamiento permanente de ninguna de las componentes.

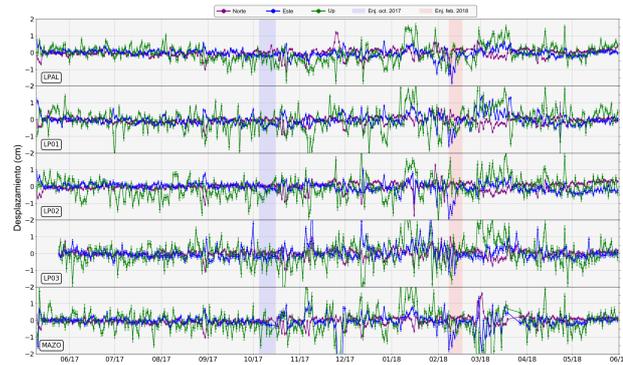


Figura 6.21: Registro de las estaciones GNSS entre mediados de abril de 2017 y junio de 2018. Cada panel muestra en cm las componentes diarias norte (violeta), este (azul) y up, vertical, (verde).

Este hecho no descarta la posibilidad de una intrusión magmática que no llegara a producir una deformación. Con el fin de estimar el mayor volumen de magma que pudiera intruirse sin generar una deformación del terreno detectable por la red GNSS, se simuló una fuente de magma puntual ubicada en el área

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

115 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

donde la sismicidad fue localizada y a una profundidad de 25 km (profundidad media entre enjambres). Aplicando un modelo de Mogi [Mogi, 1958] se estimó un volumen mínimo de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$  necesario para producir una deformación permanente de alrededor de 1 cm en las estaciones GNSS situadas cerca de las zonas de los enjambres: LP01, LP03, LP04 y MAZO (Tabla en Figura 6.22). Cualquier intrusión con un volumen superior debería haber sido detectada.

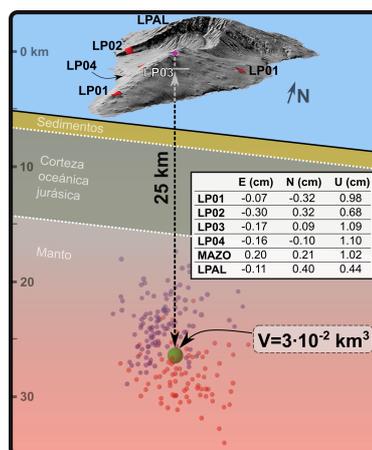


Figura 6.22: Estimación de los desplazamientos de cada componentes en cada una de las estaciones GNSS asumiendo una fuente esférica puntual (modelo de Mogi) localizada a 25 km de profundidad y un volumen de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$ . Los eventos de ambos enjambres también están incluidos, en violeta para octubre de 2017 y en rojo para febrero de 2018.

### 6.3.4. Discusión y conclusiones

Hasta septiembre de 2017, la  $(R/R_a)_c$  en QP60 registró un constante decrecimiento (Figura 6.18a) de entre  $9.63 \pm 0.08$  y  $9.95 \pm 0.07$ , en el rango de los valores previamente medidos por otros autores [Hilton et al., 2000, Padrón et al., 2015], a  $9.16 \pm 0.07$ . Este punto de muestreo se caracteriza por una clara contribución de helio tipo pluma mantélica. Además, los valores de  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

### 6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

117

este punto fueron similares a los registrados en las fumarolas del Teide [Melián et al., 2012], indicando un claro origen endógeno [Pineau and Javoy, 1983]. Bajo estas condiciones, el máximo valor de  $(R/R_a)_c$  medido,  $10.24 \pm 0.07$ , puede considerarse como término final o *end member* [Padrón et al., 2012]. Por tanto, una disminución de  $(R/R_a)_c$  en QP60 podría estar relacionado con un incremento en la emisión del helio cortical o radiogénico,  ${}^4\text{He}_{\text{crust}}$  [Tedesco, 1997, Capasso et al., 2005, Padrón et al., 2013], como sugieren los resultados de su estimación [Ballentine et al., 2002] (Figura 6.18b). Este aporte extra de  ${}^4\text{He}_{\text{crust}}$  podría estar relacionado con la microfracturación debida a un incremento en el estrés tectónico, liberando así parte del helio radiogénico producido en el decaimiento natural del uranio y torio, acumulado en el manto superior y/o en la corteza [Moreira et al., 2003, Lowenstern et al., 2014].

En QP63, la  $(R/R_a)_c$  presentó un ligero incremento antes de octubre de 2017 (Figura 6.18a) alcanzando el valor de  $7.23 \pm 0.05$  el 19 de septiembre de 2017, lo cual podría estar relacionado con un aumento en la contribución del helio de origen magmático ( ${}^3\text{He}$ ) [Carapezza et al., 2004, Capasso et al., 2005, Padrón et al., 2013, Sano et al., 2015, Rizzo et al., 2015]. Esta contribución pudo estar acompañada de valores en el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  cercanos al rango MORB [Graham, 2002] (Figura 6.18c), y similares a los más altos registrados en La Palma en gases del suelo con excepción de QP60. En conjunto, estos datos sugieren que QP63 representaba una vía de salida preferencial para los gases magmáticos [Capasso et al., 2005, Padrón et al., 2012] y como resultado, mostraba una concentración de  $\text{CO}_2$  visiblemente más alta que el valor estándar para la superficie del mar [Sweeney et al., 2016].

En cuanto al incremento en el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  detectado en QP63 antes de octubre de 2017, es importante destacar que durante 2018 se detectó un aumento similar durante el mismo periodo (verano), lo que podría sugerir un comportamiento estacional (Figura 6.18c). Teniendo en cuenta la pequeña cantidad de algas presente en este punto de muestreo, durante la fotosíntesis se pudo haber producido un fraccionamiento isotópico del  $\text{CO}_2$  [Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001], siendo mayor en verano, y por tanto, ambos incrementos en el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  podrían ser un reflejo de este fraccionamiento isotópico.

El 17 de febrero de 2017 y el 19 de septiembre de 2017, 16 días antes del primer enjambre, la concentración de hidrógeno en QP63 alcanzó los valores de  $15.0 \pm 0.8$  y  $50.8 \pm 2.5$  ppm respectivamente, altos en comparación con el nivel base atmosférico de 0.5 ppm [Derwent et al., 2019] (Figura 6.18e). Ambos incrementos podrían haber estado ligados con la microfracturación inducida por estrés [Ito et al., 1999, Saruwatari et al., 2004] en el periodo anterior al primer

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

117 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

enjambre en octubre de 2017. Sin embargo, un origen biológico es poco probable ya que el punto QP63 es un pequeño pozo con una baja cantidad de algas [Das and Vezirođlu, 2001]. Además, al no haber un comportamiento estacional ligado con la fotosíntesis de las algas, como ocurría con el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ , la primera hipótesis es más plausible. Otro hecho que corrobora la primera hipótesis es la buena correlación entre la concentración de  $\text{H}_2$  en QP63 y la estimación realizada para el  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  en QP60 (Figura 6.18b), aún cuando las fechas de los muestreos no fueron exactamente las mismas.

En octubre de 2017 al menos 128 terremotos fueron detectados y localizados. Los tres métodos empleados para estimar el valor de  $b$  proporcionaron resultados claramente superiores a uno (panel superior en la Figura 6.16e). El valor medio de  $b$  estimado sugiere que la causa de la sismicidad podría estar relacionada con fluidos magmáticos, gas y/o magma, como se ha descrito en diferentes áreas volcánicas [McNutt, 2005, Ibáñez et al., 2012, López et al., 2017].

Además de esto, se debe tener en cuenta que la profundidad a la que se localizó la sismicidad del primer enjambre coincide con el nivel de almacenamiento magmático más profundo identificado por Klügel et al. [2005] (Nivel 1 en la Figura 6.23a). A esa profundidad, entre los 15 y 26 km (430-780 MPa), los clinopiroxenos muestran un alto grado de cristalización sugiriendo un largo periodo de equilibrio, de años a décadas. Esto implica que las intrusiones magmáticas bajo Cumbre Vieja generalmente experimentan una parada durante su ascenso, aunque varios autores han informado de un ascenso con varias paradas, de al menos tres niveles [Klügel et al., 2000, 2005, Galipp et al., 2006, Barker et al., 2015].

En noviembre de 2017, la  $(\text{R}/\text{R}_a)_c$  y la concentración de  $\text{CO}_2$  en QP63 alcanzaron los  $7.94 \pm 0.05$  y  $56.6 \pm 3.0\%$  respectivamente (Figura 6.18a y d). Ambos aumentos pudieron estar relacionados directamente con las nuevas fracturas asociadas con la sismicidad del primer enjambre, las cuales crearon nuevos caminos de ascenso para gases endógenos como se ha reportado en otras zonas volcánicas [Chiodini et al., 2001, Granieri et al., 2003, Carapezza et al., 2009, Padrón et al., 2012].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

118 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

119

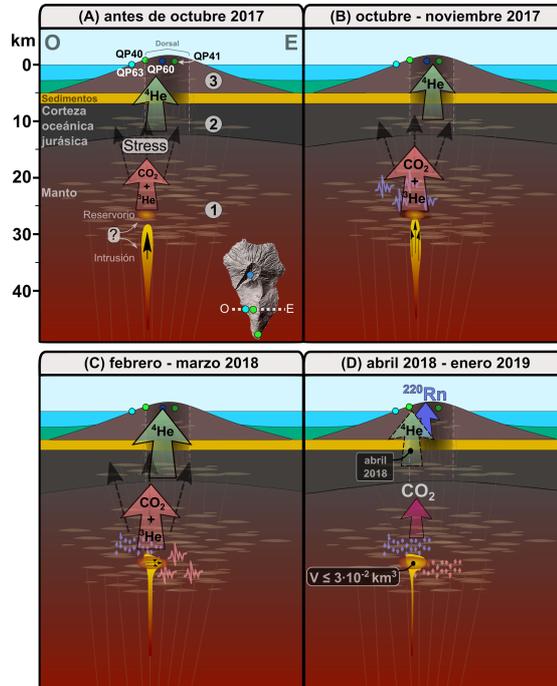


Figura 6.23: Esquemas que muestran la sección vertical este-oeste en Cumbre Vieja describiendo cada una de las fases definidas. Los números 1, 2 y 3 indican los diferentes niveles de almacenamiento del magma identificados por Klügel et al. [2005]

Teniendo en cuenta todos estos resultados, la explicación más plausible al conjunto de datos, sísmicos y geoquímicos, previos a octubre de 2017 es la de una intrusión magmática en profundidad o la de un reservorio activo localizado en el nivel 1 identificado por Klügel et al. [2005], el cual podría haberse desestabilizado (Fases A y B en la Figura 6.23).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

119 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

120

CAPÍTULO 6. RESUMEN

Independientemente de si estamos ante una nueva intrusión magmática o la desestabilización de un reservorio, es posible estimar la variación del volumen en base al momento sísmico de los eventos volcano-tectónicos (VT). Siguiendo el procedimiento descrito por White y McCausland [2016] basado en este tipo de eventos, se estimó un volumen intruido de  $1.9 \cdot 10^4 \text{ km}^3$  aplicando la siguiente ecuación (Ec. 4):

$$\log_{10} V = 0,77 * \log_{10}(\sum \text{Momento}) - 5,32 \quad (4)$$

Existen dos factores muy importantes a tener en cuenta con los que intentar explicar la profundidad a la que se localizó la sismicidad de la primera serie:

- I. No todas las intrusiones magmáticas alcanzan la superficie [Albert et al., 2015]. Considerando la historia eruptiva de La Palma [Troll and Carracedo, 2016c], el número de intrusiones magmáticas abortadas puede ser muy alto. Estas actuarían como barreras [Martí et al., 2016] dificultando el ascenso de posteriores intrusiones (Nivel 1 en Figura 6.23a).
- II. Los xenolitos peridotíticos del manto hallados en las lavas de la erupción de San Juan (1949). Klügel et al. [1998] sugirieron para estos xenolitos un origen relacionado con la fracturación de la roca caja (35 km) durante el ascenso del magma. Más tarde, Klügel et al. [2000] determinaron una profundidad entre los 26 y 36 km para la fuente de los xenolitos peridotíticos muestreados en el último evento eruptivo de la erupción de San Juan, El Duraznero.

En resumen, muy probablemente uno o la combinación de los siguientes escenarios podría explicar la ocurrencia del primer enjambre a esa profundidad:

- I. Intrusiones/reservorios previos que pudieran actuar como barreras [Klügel, 1998, Klügel et al., 2000].
- II. La fracturación de la roca caja peridotítica en el manto superior [Rubin, 1995, Klügel, 1998].

Las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en QP40 y QP41 antes e inmediatamente después de la primera serie parecen estar relacionadas con un comportamiento estacional consecuencia de una influencia meteorológica (en este caso la temperatura atmosférica).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

120 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

120 / 229

### 6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

121

En febrero de 2018 tuvo lugar la segunda serie sísmica con al menos 84 eventos detectados y localizados. El valor medio estimado para  $b$  es de  $2.3 \pm 0.2$ , sugiriendo nuevamente el desempeño de un papel importante de los fluidos magmáticos en el origen de la sismicidad [McNutt, 1996, 2005, Ibáñez et al., 2012].

Esta serie se localizó a una mayor profundidad que la primera, hecho confirmado con la diferencia de los tiempos de las fases P y S,  $\Delta T_{STP}$ , y la relocalización de los eventos (Figuras 6.16d y 6.17). Más aun, la migración al oeste detectada no solo se observó en la sismicidad localizada (Figura 6.17a y b) sino también en la relocalización conjunta (Figura 6.17c). Este desplazamiento pudo deberse a la alta heterogeneidad presente en los sistemas volcánicos a esa profundidad en donde la intrusión podría haber encontrado alguna barrera [Klügel et al., 2005, Taisne et al., 2011, Barker et al., 2015, Martí et al., 2016, 2017] haciendo que un movimiento lateral requiriera menos energía que uno vertical (Fase C en la Figura 6.23).

Una vez más, se registró un aumento de la concentración de  $H_2$  en QP63 18 días antes del segundo enjambre alcanzando el máximo valor el 8 de marzo de 2018, el cual pudo estar relacionado con un aumento en el estrés tectónico induciendo microfracturación de la roca, así como con las fracturas asociadas a los eventos sísmicos [Ito et al., 1999, Saruwatari et al., 2004].

Llegados a este punto, sería deseable poder estimar la forma de la intrusión magmática pero para ello sería necesario disponer de datos de deformación. Al carecer de ellos, puesto que no se detectó deformación alguna por parte de la red GNSS, si es posible estimar el volumen intruido o expandido [White and McCausland, 2016]. El resultado es de  $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$ , el cual es prácticamente el doble que el obtenido para el primer enjambre.

El 8 de marzo de 2018, la  $(R/R_a)_c$  alcanzó su máximo valor,  $8.23 \pm 0.12$ , en QP63 (Figura 6.18a). Las fracturas asociadas al enjambre posiblemente facilitaron un rápido ascenso de los gases magmáticos [Chiodini et al., 2001, Granieri et al., 2003, Carapezza et al., 2009, Padrón et al., 2012], como ocurrió tras la primera serie sísmica en noviembre de 2017. Aunque el número total de eventos en el segundo enjambre fue inferior al del primero, las magnitudes fueron más altas lo que implica fracturas mayores [Olson and Allen, 2005].

A continuación, la  $(R/R_a)_c$  en QP63 y QP60 descendieron, llegando en este último a su valor mínimo. En QP60, la contribución del helio cortical fue alta durante esas fechas (Figura 6.18b). Estas tendencias probablemente estuvieron relacionadas con el incremento en el estrés tectónico y la sismicidad ocurrida

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

121 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

en febrero de 2018, liberando ambos procesos  ${}^4\text{He}_{\text{crust}}$  a través de la fracturación [Capasso et al., 2005, Padrón et al., 2013, Lowenstern et al., 2014] (Figura 6.18d).

En QP40 se produjo un brusco salto en la concentración de  ${}^{220}\text{Rn}$  en febrero de 2018, después del segundo enjambre, pasando de un valor medio de  $15 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$  a  $28 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ . Para estar seguros de que este abrupto incremento en la concentración de  ${}^{220}\text{Rn}$  era real, se determinaron los intervalos de confianza de la media ( $\alpha=0.05$ ). De esta forma, durante los 15 días anteriores a la segunda serie sísmica, la concentración de  ${}^{220}\text{Rn}$  fue de  $19 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$  y de  $26 \pm 2 \text{ Bq/m}^3$  en la siguiente quincena. Este incremento también fue confirmado al reemplazar el monitor de  ${}^{222}\text{Rn}$  y  ${}^{220}\text{Rn}$  por un nuevo dispositivo calibrado en julio de 2018, obteniéndose los mismos valores de  ${}^{220}\text{Rn}$ . Por tanto, es posible afirmar que el aumento de  ${}^{220}\text{Rn}$  fue real y podría estar relacionado con el estrés tectónico, el cual podría haber causado microfracturación y liberar así el  ${}^{220}\text{Rn}$  procedente del decaimiento del radio [Giammanco et al., 2007, Tuccimei et al., 2010, Scarlato et al., 2013] (Fase D en Figura 6.23). Este proceso debió ser relativamente superficial ya que el  ${}^{220}\text{Rn}$  presenta una vida media muy corta y no se registró un aumento simultáneo del  ${}^{222}\text{Rn}$  [Giammanco et al., 2007].

La concentración de  ${}^{220}\text{Rn}$  en QP41 mostró un ligero incremento a lo largo de su registro. Dos resultados respaldan esta hipótesis:

- I. La regresión lineal practicada al registro del  ${}^{220}\text{Rn}$  es capaz de explicar el 50 % de la varianza.
- II. El análisis de las medias mensuales. Si se determinan los intervalos de confianza de la media de la concentración se obtuvieron los siguientes resultados ( $\alpha=0.05$ ): de mediados de octubre de 2017 a mediados de noviembre de 2017,  $13 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; de mediados de diciembre de 2017 a mediados de enero de 2018,  $20 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; de mediados de octubre de 2018 a mediados de noviembre de 2018,  $23 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; y de mediados de diciembre de 2018 a mediados de enero de 2019,  $25 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ .

Este ligero incremento en la concentración de  ${}^{220}\text{Rn}$  podría estar relacionado con el mismo proceso tectónico descrito para QP40 [Giammanco et al., 2007, Tuccimei et al., 2010, Scarlato et al., 2013]. Sin embargo, y debido a que el  ${}^{220}\text{Rn}$  en QP41 mostró una tendencia estacional durante el verano de 2018 (Figura 6.20b5), reflejando una influencia de los parámetros atmosféricos, no es posible descartar una influencia meteorológica a largo plazo [Cigolini et al., 2009, Laiolo et al., 2016]. Esta cuestión será resuelta cuando se disponga de un registro

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.3. UNREST SIGNALS AT CUMBRE VIEJA

123

temporal mucho mayor, de varios años.

El ligero desplazamiento de la sismicidad hacia el este, sugerido por la localización y sobretodo por la relocalización de los eventos sísmicos, implicaría que el magma habría migrado a una zona más cercana de la dorsal de Cumbre Vieja. Debido a que esta zona se encuentra altamente fracturada debido a las erupciones que han tenido lugar en ella [Romero Ruiz, 1989, Troll and Carracedo, 2016c], los gases magmáticos encontrarían una vía preferencial por la que ascender a la superficie [Padrón et al., 2012], lo cual se vería reflejado en una migración de la emisión gaseosa al centro del campo monogénico. Esto podría explicar la constante disminución en el  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  en QP63, posiblemente debido a una menor contribución de gases magmáticos y/o más alta contribución biogénica [Chiodini et al., 2008, Padrón et al., 2015].

Esta migración de la emisión gaseosa también podría ser la explicación para los incrementos de  $^{220}\text{Rn}$  en QP40 y QP41, en los que podría estar involucrado un aumento en la emisión difusa de  $\text{CO}_2$ , actuando este como gas portador [Neri et al., 2016] (Fase D en Figura 6.23). Esta emisión de dióxido de carbono debió de ser baja ya que no se detectó un claro incremento en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en ambos puntos (Figura 6.20a4 y b4) [Giammanco et al., 2007]. Las antiguas o nuevas fracturas en la dorsal y/o un cambio en el campo de esfuerzos podría haber facilitado el ascenso del dióxido de carbono [Neri et al., 2016, Falsaperla et al., 2017].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

123 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

124 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Capítulo 7

### Conclusiones

En la presente Tesis Doctoral se han desarrollado y aplicado diferentes metodologías con las que estudiar, tanto de forma discreta como continua, la emisión gaseosa de origen volcánico en las obras de captación de aguas subterráneas presentes en el archipiélago y su aplicación a la vigilancia volcánica.

En base a los objetivos propuestos y los resultados obtenidos en los tres artículos publicados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las galerías, pozos y sondeos se han revelado como emplazamientos idóneos en donde realizar un seguimiento de la emisión gaseosa de origen volcánico durante procesos de reactivación y eruptivos en Canarias.
- Su gran número y localización, así como sus geometrías, facilitan enormemente la correcta selección de los puntos de medida.
- La dinámica de la atmósfera interna en una galería puede llegar a ser muy compleja cuando hay presente una anomalía térmica. Esto ya no es solo importante para una correcta interpretación de cualquier parámetro relacionado con la vigilancia volcánica, sino también en todas aquellas galerías donde se realicen trabajos con personal en su interior.
- Los registros de dióxido de carbono en una galería y de  $^{222}\text{Rn}$  en un pozo mostraron variaciones inequívocamente relacionadas con la activada volcánica.
- Los datos obtenidos de la emisión gaseosa ayudaron, de forma decisiva, a la interpretación de los parámetros geofísicos registrados por otras técnicas geofísicas.

125

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

125 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

125 / 229

126

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

- Siguiendo una buena *praxis* en la vigilancia volcánica, se pudo proponer una explicación global de todos los datos adquiridos, geoquímicos y geofísicos.
- El control de las emisiones gaseosas de origen profundo en galerías, pozos y sondeos, así como su estudio e interpretación proporcionan una valiosa información con la que colaborar en la reducción del riesgo volcánico.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

126 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

126 / 229

## Capítulo 8

### Trabajos futuros

Sería deseable disponer de un mayor número de datos de las emisiones gaseosas en obras de captación de aguas subterráneas durante periodos de reactivación y erupción. Así sería más fácil la identificación de cuales son las características geológicas que determinan porqué unos emplazamientos son preferentes respecto a otros. Pero debido por un lado al corto registro instrumental disponible en las islas y por otro, al largo periodo de recurrencia entre eventos eruptivos, existe un vacío de conocimiento en este sentido.

Mientras se espera a la próxima reactivación y/o erupción, es posible plantear diferentes trabajos que permitan entender como es la dinámica interna de una galería, pozo y/o sondeo, y potenciar así el conocimiento de este campo.

Como primera propuesta a futuro se podrían repetir los perfiles de temperaturas y concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de otras galerías, tanto en Tenerife como en otras islas. En el caso de detectar nuevas anomalías térmicas, algo bastante probable, determinar si existe una concentración anómala de dióxido de carbono asociada a ellas e investigar su origen a partir de las relaciones isotópicas del gas del suelo. Es necesario incluir en este estudio la descripción geológica tanto de la propia galería como la local. De esta forma se podría confirmar que el procedimiento seguido en el primer artículo de la presente Tesis es confiable.

Estos estudios sobre anomalías térmicas en el interior de las galerías, asociadas o no a la emisión de CO<sub>2</sub>, podrían estar acompañados de la medida del potencial espontáneo a lo largo de su traza. Esta técnica es usada ampliamente en volcanología con el objetivo de identificar fracturas o fisuras por las que circulan fluidos. Apoyándose en sus resultados sería factible determinar si las emisiones de gas dentro de las galerías están relacionadas o no con este tipo de estructuras geológicas.

127

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

127 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

127 / 229

Aunque existen numerosos estudios sobre ventilación en cavidades subterráneas, este no es el caso de las galerías. A pesar de su simple geometría, su dinámica interna puede ser muy compleja como se puso de manifiesto en el primer trabajo. Un estudio del régimen de ventilación de una galería sería muy sencillo de realizar. Instalando al menos un anemómetro en el interior, siendo deseable alguno más estratégicamente situado, y otro más localizado en la bocamina, se podría tener monitorizado el movimiento de la masa de aire. Con ayuda del registro de al menos una estación de radón en el interior, pero al igual que con los anemómetros, sería deseable desplegar el mayor número posible, también se obtendría información muy valiosa relacionada con el régimen de ventilación.

En estos estudios de ventilación sería deseable tener muy en cuenta cuales son las estructuras geológicas y tipos de terreno próximos a la galería (geología local), por si estos pudieran facilitar algún tipo de camino preferencial para la ventilación además de la propia bocamina.

Como última propuesta, se plantea el desarrollo y despliegue de un sistema de alerta temprana en Tenerife basado en el registro de la temperatura y concentraciones de dióxido de carbono y  $^{222}\text{Rn}$  en los frentes de las galerías más profundas que penetren en el sistema volcánico Teide-Pico Viejo.

En esta isla, a diferencia de La Palma y El Hierro y según diversos estudios, se ha detectado la presencia de una cámara magmática somera en continua desgasificación. Una buena prueba de ello es la presencia de fumarolas en el cráter del Teide. Por la localización estimada de esta cámara magmática, las especies volátiles que son liberados a alta temperatura de este magma somero recorrerían un camino más corto hasta alcanzar la superficie, por lo que a priori, un incremento de la desgasificación sería más fácilmente detectable en estos frentes debido al menor número de interacciones del gas magmático con el medio.

Los frentes de las galerías que penetran en lo más profundo del complejo Teide-Pico Viejo, como es el caso de Río de Guía, se revelarían como excepcionales emplazamientos donde obtener un registro continuo de la temperatura del suelo y del aire, así como de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $^{222}\text{Rn}$ , con el fin de detectar el más mínimo cambio en la emisión gaseosa. Es importante recordar en este sentido que la variación total en la temperatura del suelo de la estación más profunda, ST04, del primer artículo arrojó un valor de  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ .

Aprovechando los avances de los últimos años en la reducción del consumo eléctrico en la instrumentación (termómetros, sensores de  $\text{CO}_2$  y  $^{222}\text{Rn}$ ) y en las

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

129

técnicas de comunicación, sería factible la transmisión en tiempo real de estos equipos situados a varios kilómetros de profundidad.

Esta última propuesta podría enmarcarse dentro de un proyecto que englobara a distintas instituciones, las cuales aportarían tanto personal técnico como especialista en el diseño de la posible red, equipos de medida, transmisión y tratamiento de los datos así como en su interpretación.

Todos estos trabajos contribuirían a definir un nivel base de actividad, en época de calma volcánica, sobre la que detectar e identifica futuras anomalías potencialmente relacionadas con procesos de reactivación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

129 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

129 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

130 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Unidades y acrónimos

### Símbolos

$\delta^{13}\text{C-CO}_2$  Relación isotópica entre los isótopos 12 y 13 del carbono con respecto al patrón Viena Pee Dee Belemnite, VPDB. 21, 74, 82, 90, 91, 112, 113, 116-118, 123

$(\text{R}/\text{R}_a)_c$  Relación isotópica entre el helio-3 y helio-4 corregida respecto a su relación atmosférica. 21, 74, 107, 111, 112, 116-118, 121

$^4\text{He}_{\text{crust}}$  Helio-4 de origen cortical o del manto superior por decaimiento radiogénico. 21, 74, 111, 112, 117, 118, 122

**3C** Acrónimo de tres componentes de un sensor sísmico: norte, este y vertical. 108

### A

**AEMET** Agencia Estatal de METeorología. 19, 20, 22, 95, 106, 114

**AERO** Estación meteorológica perteneciente al AEMET localizada en el aeropuerto de El Hierro. 19, 20, 95, 99

### B

**BALN** Estación meteorológica perteneciente al AEMET localizada en el municipio de Frontera, El Hierro. 19, 20, 95, 99

**BCE** Before Common Era. Notación empleada en dataciones refiriéndose a fecha anteriores al nacimiento de Cristo, por tanto, equivalente a a. C. (antes de Cristo). 37, 96

**bit** Unidad mínima de información, que puede tener solo dos valores, cero o uno. 69

**BP** Before Present. 81

**Bq/m<sup>3</sup>** Bequerelio por metro cúbico. 113, 114, 122

### C

**CADE** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Adeje, Tenerife. 17, 41

**CCD** Charge-coupled device. Son los sensores empleados en cámaras digitales para convertir la luz recibida en una señal eléctrica. 55

**CE** Common Era. Notación empleada en dataciones refiriéndose a fecha posteriores al nacimiento

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

132

Unidades y acrónimos

- de Cristo, por tanto, equivalente a d. C. (después de Cristo). 37, 96
- CENR** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de El Paso, La Palma. 108
- CFLP** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Fuencaiente, La Palma. 108
- CGOR** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Punta-gorda, La Palma. 108
- CJED** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de El Paso, La Palma. 107
- CLLA** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Los Llanos de Aridane, La Palma. 108
- cm** Centímetros. 22, 47, 49, 69, 71-73, 115, 116
- CMIR** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de El Paso, La Palma. 108
- cpm** Cuentas por minuto. Unidad empleada para contar el número de desintegraciones de una especie radiactiva. 70, 83, 97-99
- CPUN** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Punta-llana, La Palma. 107
- CROM** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el Roque de los Muchachos, La Palma. 108
- CTEN** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Fuencaiente, La Palma. 107
- CVIE** Estación sísmica de tres componentes y corto periodo localizada en el municipio de Mazo, La Palma. 108
- D**
- DOAS** Proceso por el cual la abundancia de especies gaseosas en una columna o pluma volcánica es determinada mediante la medida de la radiación electromagnética en un rango del espectro determinado. 55
- E**
- EDD** Terrenos porosos, fracturas, fisuras o cualquier otro tipo de estructura tectónica que facilita la emisión difusa de los gases magmáticos. 90, 91
- EHIG** Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en el municipio de Mazo, La Palma. 107, 108
- F**
- FRON** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de Frontera, El Hierro, y perteneciente a GRAF-CAN. 19, 20, 76, 95, 100-103
- FTIR** Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. Técnica utilizada para obtener un espectro infrarrojo de absorción o emisión de un

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

132 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Unidades y acrónimos

133

- sólido, líquido o gas. Un espectrómetro FTIR recolecta simultáneamente datos de alta resolución espectral en un amplio rango espectral. 55
- FUEN** Estación meteorológica perteneciente al AEMET localizada en el municipio de Fuencaliente, La Palma. 20, 22, 71, 106, 114
- G**
- g** Valor medio de la gravedad terrestre, 9.81 m/s<sup>2</sup>. 42
- GNSS** Global Navigation Satellite System. Es una constelación de satélites que transmite señales con las que es posible realizar el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre. 17, 19, 22, 23, 29, 43, 44, 76, 95, 100, 108, 115, 116, 121
- H**
- h** Horas. 66, 87, 88
- HI01** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de Valverde, El Hierro. 19, 20, 76, 95, 100, 101, 103
- hm<sup>3</sup>** Hectómetro cúbico. 62
- HTAC** Estación multiparamétrica de gases que fue desplegada en la galería Tacorón (El Pinar, El Hierro) a mediados de noviembre de 2011. 71, 97
- HTIG** Estación multiparamétrica de gases que fue desplegada en la galería Tigrote (Valverde, El Hierro) a finales de julio de 2011 y retirada en el mes de noviembre del mismo año. 71, 97
- HTIN** Estación multiparamétrica de gases que fue desplegada en la galería Tincos (Frontera, El Hierro) a finales de julio de 2011. 20, 71, 97-101, 103-105
- HVER** Estación multiparamétrica de gases que fue desplegada en la galería El Verodal (Frontera, El Hierro) a finales de julio de 2011. 71, 97
- hypoDD** Programa informático que implementa el algoritmo de localización de terremotos mediante la técnica de la doble diferencia. 21, 75, 110
- Hz** Hercio. Unidad de frecuencia. 41
- I**
- IAVCEI** International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior. Asociación internacional de volcanología y estudio de la química del interior de la Tierra. 25
- IGN** Instituto Geográfico Nacional. 17, 20, 41, 69, 70, 73, 74, 76, 77, 96, 100, 106-108
- J**
- J** Julio, unidad de energía. 109
- JQZ** Jurassic Quiet Zone. Zona de la corteza oceánica donde la anomalía magnética cortical es débil y difícil de interpretar ya que pertenece a las partes más antiguas de corteza oceánica. 32

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

133 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

134

Unidades y acrónimos

- K** el 100% de los eventos sísmicos son detectados. 21, 75, 109, 110
- ka** Kilo año, mil años. 79, 96, 106, 107
- kg/s** Kilogramos por segundo. 55
- km** kilómetros. 22, 26, 28, 31, 34, 37, 60, 62, 75, 78, 79, 96, 107, 108, 110, 116, 118, 120
- km<sup>2</sup>** Kilómetros cuadrados. 31, 78, 95
- km<sup>3</sup>** Kilómetros cúbicos. 22, 29, 37, 116, 120, 121
- L**
- L/s** Litros por segundo. 62
- LP01** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de Fuenaliente, La Palma. 76, 108, 116
- LP02** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el Time, La Palma. 76, 108
- LP03** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de El Paso, La Palma. 76, 108, 116
- LP04** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de Fuenaliente, La Palma. 76, 108, 116
- LPAL** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el Roque de los Muchachos, La Palma. 76, 108
- M**
- m** Metro. 26, 27, 59, 63, 64, 66, 72, 79, 81, 82, 90, 91, 93, 94, 97
- m s.n.m.** Metros sobre el nivel del mar. 107
- m/d** Metros por día. 66
- M<sub>c</sub>** Magnitud de completitud. Es la magnitud más baja para la cual
- m<sup>2</sup>** Metros cuadrados. 62
- Ma** Millones de años. 32, 33, 78, 79, 95, 106, 107
- MAZO** Estación GNSS con receptor de doble frecuencia situada en el municipio de Mazo, La Palma, y perteneciente a GRAFCAN. 76, 108, 116
- mbLg** Escala de magnitud definida a partir de la amplitud de la fase Lg. 109
- MC** Montaña Chio. 81, 91
- MCT** Montaña Cruz de Tea. 81, 91
- mct** Minutos. 70, 72, 82
- MORB** Mid-Ocean Rift Basalts. Es una variedad de basalto submarino emitido por las dorsales oceánicas. Son las rocas más voluminosas del planeta y constituyen los 1-2 km más superficiales de la corteza oceánica. 82, 107, 111, 117
- MPa** Megapascales. 118
- Multi-Gas** Instrumentación especialmente diseñada para el registro en tiempo real de la concentración en el aire de varias especies gaseosas haciendo uso de sensores electroquímicos. 18, 48, 51, 54
- N**
- NDIR** Non Dispersive Infrared. Técnica empleada en la estimación de la concentración de gases (CO<sub>2</sub> por ejemplo) en la que se miden las frecuencias infrarrojas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

134 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Unidades y acrónimos 135

absorbidas a partir de una fuente conocida. 48, 70

**nm** Nanómetro. 55

**P**

**PASO** Estación meteorológica perteneciente al AEMET localizada en el municipio de El Paso, La Palma. 20, 22, 71, 106, 114

**pH** Medida de la acidez de una disolución mediante una escala logarítmica (0-14) de la concentración de iones hidrógeno. 52

**PMT** Punto de Máxima tTemperatura hallado en el interior de la galería Río de Guía y situado a unos 2000 m de profundidad. 79, 81-83, 85, 87, 89-91, 93, 94

**ppm** Partes por millón. 23, 70, 80-83, 98, 111-113, 117

**ppm m** Partes por millón por unidad de trayecto. 55

**ppm/d** Partes por millón por día. 90, 98

**PVC** Policloruro de Vinilo. Producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Uno de los plásticos más empleados en la industria. 18, 50, 51, 71

**Q**

**QP40** Estación de registro de la emisión difusa de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn localizada en Jedey, La Palma. 22, 71, 108, 113, 114, 120, 122, 123

**QP41** Estación de registro de la emisión difusa de <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn localizada en Fuencaliente, La Palma. 22, 71, 108, 113-115, 120, 122, 123

**QP60** Sondeo situado en La Caldera de Taburiente (La Palma), también conocido como Dos Aguas, donde se tomaron muestras de gases libres. 21, 74, 107, 108, 111-113, 116-118, 121

**QP63** Pequeño pozo cerca del mar en la costa oeste de La Palma donde se tomaron muestras de gases disueltos. 21, 74, 108, 111-113, 117, 118, 121, 123

**R**

**R/R<sub>s</sub>** Relación isotópica helio-3 y helio-4. 21, 111, 113

**radianes** Ángulo central de una circunferencia que abarca un arco de igual longitud que el radio de la misma. 43

**RdG** Río de Guía. 18, 19, 23, 26, 72, 73, 78-81, 90

**RSIM** Estación de radón localizada en el pozo de San Simón (Frontera, El Hierro) que fue instalada a mediados de agosto de 2011. 20, 70, 71, 97-99, 101-104

**RSN** Red Sísmica Nacional. 108

**S**

**S1** Componente frecuencial de 24 horas. 87

**S2** Componente frecuencial de 12 horas. 86, 87

**SD** Secure Digital. Memoria de almacenamiento de datos portátil. 69

**ST01** Estación multiparamétrica situada a 1000 m de profundidad en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

135 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

136

Unidades y acrónimos

la galería Río de Guía. 71, 82–86, 88–94	la galería Río de Guía. 19, 80, 82–86, 88, 90–94
<b>ST02</b> Estación multiparamétrica situada a 1600 m de profundidad en la galería Río de Guía. 71, 82–94	<b>T<sub>s</sub></b> Temperatura del suelo en el emplazamiento de la estación en el interior de la galería. 23, 71, 79, 80, 82, 83, 88, 91, 93
<b>ST03</b> Estación multiparamétrica situada a 2100 m de profundidad en la galería Río de Guía. 71, 82–94	<b>TBT</b> Estación sísmica de tres componentes y banda ancha localizada en La Caldera de Taburiente, La Palma. 107, 108
<b>ST04</b> Estación multiparamétrica situada a 2600 m de profundidad en la galería Río de Guía. 71, 82–94, 128	<b>V</b>
<b>T</b>	<b>V</b> Voltios. 70
<b>t/d</b> Toneladas por día. 55	<b>valor de b</b> Pendiente de la relación entre la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos en la ley de Gutenberg-Richter. 21, 28, 75, 109, 110, 118
<b>T<sub>a</sub></b> Temperatura ambiente en el interior de una galería. 23, 71, 79, 80, 82, 83, 88, 91, 93	<b>ΔT<sub>S</sub>T<sub>P</sub></b> Diferencia entre el tiempo de llegada de la fase S y la P. 110, 121
<b>T<sub>e</sub></b> Temperatura exterior de una galería. Corresponde a la temperatura atmosférica. 19, 82–88, 90–94	
<b>T<sub>m</sub></b> Temperatura media en el interior de	

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

136 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2916373	Código de verificación: 1MCyi070
Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Glosario

- A**
- A** Punto de muestreo de gas del suelo en el interior de la galería Río de Guía (Tenerife) situado a 2050 m de profundidad. 73, 74, 81, 82
- acidificación** Descenso en el valor de pH. Causado por la absorción de dióxido de carbono. 52
- acuífero** Capa o capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir un flujo significativo de aguas subterráneas. 25, 46, 52, 59, 62, 65
- acuífero costero** Acuífero localizado cerca de la línea de costa. 59, 60
- acuífero de vertiente** Acuífero localizado en altura, normalmente por encima de la cota 400 m y por lo general en las zonas de las dorsales. 59, 60
- alcalinidad** Capacidad de un agua para neutralizar ácidos. En volcanología suele emplearse la alcalinidad total carbonatada ya que es equivalente a las concentraciones de bicarbonatos y carbonatos, especies directamente relacionadas con el CO<sub>2</sub>. 52
- alcalino** Magma rico en metales alcalinos, especialmente sodio y potasio que se genera a partir de la fusión parcial de peridotitas en zonas profundas. 34
- Anaga** Uno de los tres volcanes en escudo que se crearon durante las primeras etapas evolutivas de la isla de Tenerife. Actualmente, está presente como un macizo erosionado en el noreste de la isla. 61, 78
- anomalías de Bouguer** Diferencia entre el valor de gravedad en un punto de la superficie del geode y su correspondiente valor de gravedad teórico sobre el elipsoide. 56
- Antiguas series volcánicas** Corresponden con el segundo episodio eruptivo tras la emersión del archipiélago coincidiendo con las etapas finales de inyección filoniana. La actividad volcánica fue preferencialmente subaérea y formada por coladas de basaltos con intercalados de piroclastos. 106

137

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

137 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

137 / 229

138

Glosario

**astenosfera** Capa situada bajo la litosfera de unos 100 km de espesor y en la que los materiales se pueden encontrar en fusión parcial o total. 33

**B**

**B** Punto de muestreo de gas del suelo en el interior de la galería Río de Guía (Tenerife) situado a 1600 m de profundidad. 73, 74, 81, 82

**banda ancha** Tipo de sismómetro que es capaz de registrar el movimiento del suelo en un amplio rango de frecuencias, por lo general de 0.01 a 50 Hz. Requieren de alimentación eléctrica para operar. 17, 41, 108

**basalto** Roca ígnea, de color oscuro y composición máfica (bajo contenido en sílice) que constituye una de las rocas más abundantes del planeta. 34, 67, 79, 107

**bocamina** Denominación local que recibe la entrada de una galería. 18, 26, 61, 62, 72, 85, 90, 91, 128

**Bootstrap** Método no paramétrico en el que mediante el muestreo aleatorio de un conjunto de datos. 75

**Butterworth** Tipo de filtro en el que la respuesta es plana en la banda de paso y hasta la frecuencia de corte. 20, 22, 71, 99, 114, 115

**básico** Magma que posee menor proporción de sílice (menos del 50%). Son ricos en calcio y magnesio. Es un magma fluido que se localiza en las zonas

de dorsal y forma rocas como el basalto y el gabro. 34, 104

**C**

**Caldera de Taburiente** Es el mayor accidente geográfico de La Palma. Es una depresión que supera los 1000 m de altura y un diámetro de 8 km. Se sitúa en la parte norte de la isla abriéndose hacia el suroeste a través del Barranco de Las Angustias. En una de sus cumbres se sitúa el punto más alto de la isla, el Roque de Los Muchachos (2426 m s.n.m). En su formación ha jugado un papel fundamental la erosión junto a grandes deslizamientos. 20, 36, 106, 107

**Chahorra** Erupción acontecida en 1798 en el flanco oeste de Pico Viejo, Tenerife. 79

**Chavao** Estación meteorológica perteneciente al Cabildo de Tenerife y localizada a 2017 m de altura en el municipio de Guía de Isora. 18, 78

**clinopiroxeno** Piroxeno, silicato que forma parte de muchas rocas ígneas y metamórficas, que cristaliza con estructura monoclinica. 118

**columna eruptiva** Mezcla de diferentes productos volcánicos (bombas, bloques y cenizas entre otros) y gases que se eleva sobre el centro eruptivo pudiendo alcanzar varios kilómetros de altura. 37

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

138 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Glosario

139

- columnas eruptivas** Ver columna eruptiva. 46
- complejo basal** Fase inicial en la formación de cada isla. Es una mezcla de rocas plutónicas, diques, restos sedimentarios y lavas almohadilladas. Es visible en las islas de Fuerteventura, La Gomera y La Palma. 106
- conductividad eléctrica** Capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica. En el caso del agua está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua. 52
- cono de cinder** Pequeño edificio volcánico con forma de cono truncado formado por lapilli (picón), escorias y bombas volcánicas y pequeños flujos lávicos. Generalmente son de composición basáltica. 81
- conos de cinder** Ver cono de cinder. 35, 96
- contador** Dispositivo electrónico especializado en contar basándose en los cambios de una señal analógica o digital. 69, 70
- continental** Uno de los dos tipos de corteza que existen. Esta, a diferencia de la oceánica, es más gruesa, 35 km de espesor medio, y es heterogénea en composición. Forma parte de los continentes y de sus plataformas. 34
- correlación de Pearson** Medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. 88
- corteza oceánica** Uno de los dos tipos de corteza que existen. Esta, a diferencia de la continental, es más delgada, 10-15 km de espesor medio, y es muy homogénea en composición, principalmente basáltica. 32, 34
- corto periodo** Tipo de sismómetro mecánico que es capaz de registrar el movimiento del suelo en un amplio rango de frecuencias, por lo general siempre por encima de 1 Hz. No requieren de alimentación eléctrica para operar. 41, 108
- Cretácico** Periodo geológico perteneciente a la era Mesozoica con una duración comprendida entre los 145 y 66 millones de años. 33
- cromatografía iónica** Método para el análisis de trazas de aniones y cationes. Se basa en el uso de resinas de intercambio iónico. Cuando una muestra iónica atraviesa estas columnas, los iones presentes se separan debido a las diferentes retenciones que sufren al interactuar con la fase estacionaria de las columnas analíticas. Una vez separada, la muestra pasa a través de un detector (conductimétrico, amperométrico, UV...) donde se registra la señal obtenida respecto al tiempo de retención. 48, 52
- cromatógrafos de gases** Equipos especialmente diseñados en la aplicación de la cromatografía de gases. En esta técnica la muestra se volatiliza y se inyec-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

139 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

140

Glosario

ta en la cabeza de una columna cromatografía. La elución se produce por el flujo de una fase móvil que es un gas inerte, y a diferencia de la mayoría de los tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna. 48, 50

**Cámara UV** Cámara especialmente diseñada para capturar la radiación electromagnética en el rango del ultravioleta: 380 a 10 nm. 55

## D

**datalogger** Equipo electrónico especialmente diseñado para la adquisición y almacenamiento de datos de sensores conectados a él. Cada medida tiene asociada una marca de tiempo.. 69

**decaimiento** Proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable, emitiendo partículas y/o fotones y liberando energía durante el proceso. 88, 89, 117, 122

**deslizamiento** Movilización de una enorme cantidad de material el cual puede tener un origen relacionado con parámetros meteorológicos (precipitación) y/o geofísicos (terremotos, deformación del terreno...). 19, 34–36, 95, 96, 107

**desviación estándar** Medida que se utiliza para cuantificar la varia-

ción o la dispersión de un conjunto de datos numéricos. 113

**dique** Fractura rellena de magma que atraviesa la roca circundante. 18, 27, 59, 64, 78, 81, 90

**dorsal** Edificio poligenético con una morfología similar a un tejado a dos aguas en donde las coladas fluyeron ladera abajo. Se caracterizan por una línea de cumbre marcada. 19, 28, 29, 35, 37, 38, 59, 63, 95, 96, 108, 123

**dorsal noreste** También conocida como dorsal de La Esperanza está comprendida entre el complejo central Teide-Pico Viejo y el macizo de Anaga, Tenerife. En ella se han producido erupciones históricas como la de Arafo-Siete Fuentes-Fasnia (1704-1705). 79

**dorsal noroeste** También conocida como dorsal de Teno está comprendida entre el complejo central Teide-Pico Viejo y el macizo de Teno, Tenerife. En ella se produjo la última erupción en la isla, Chinyero (1909). 79, 81, 90

## E

**El Verodal** Galería convencional situada en el noroeste de la isla de El Hierro a una cota de 120 m s.n.m y una profundidad de unos 2000 m . 71

**end member** Valor máximo esperado para una relación isotópica dada. Normalmente suele ser el mayor valor hallado para di-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

140 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Glosario

141

- cha relación isotópica. 21, 111, 113, 117
- energía sísmica** Cantidad de energía emitida por un evento sísmico en su fuente. Es posible hacer una estimación de esta energía a partir del valor de magnitud. 20, 21, 28, 75, 99, 101–103, 109
- enjambre** Conjunto de eventos sísmicos, por lo general de baja magnitud, que ocurren en un corto periodo de tiempo (minutos, horas e incluso días) y con en un área muy restringida (pocos km<sup>2</sup>). 21, 22, 28, 29, 40, 108–112, 114–118, 120–122
- Eoceno** Época geológica que pertenece al periodo Paleógeno, el cual está comprendido dentro de la era Cenozoica. Comenzó hace unos 56 millones de años y terminó hace unos 34 millones de años. 33
- epicentro** Proyección vertical en la superficie terrestre del foco o hipocentro de un evento sísmico. 42
- erupciones monogenéticas** Proceso eruptivo que solo ocurre una vez en un lugar determinado formando, por lo general, un pequeño cono. 35
- espectrómetros de masas** Dispositivo que permite analizar con gran precisión la composición de diferentes elementos químicos e isótopos atómicos, separando los núcleos atómicos en función de su relación entre masa y carga. 48, 50
- estromboliana** Asociadas a la emisión de magmas basálticos y se caracterizan por la emisión de piroclastos (bombas volcánicas, escorias, lapilli y cenizas) que forman los típicos conos de cinder. Estas erupciones emiten columnas eruptivas que no alcanzan alturas considerables. Un ejemplo de este tipo fue la erupción del Teneguía acontecida en La Palma en 1971. 36–38
- estrés tectónico** Sistema de fuerzas al que está sometida la litosfera debido al movimiento tectónico. 29, 101, 102, 117, 121, 122
- euro-asiática** Placa tectónica que abarca Eurasia, Europa y Asia, exceptuando el subcontinente indio, Arabia y parte de la zona este de Siberia. 33
- F**
- fases P** Onda elástica longitudinal. Son las primeras en ser registradas en un sismómetro tras la ocurrencia de un evento sísmico. 21, 40–42, 74, 75, 109, 110, 121
- fonolita** Roca volcánica de tonos oscuros a claros asociada a un magma relativamente evolucionado. 34, 79
- fraccionamiento isotópico** Procesos que afectan a la abundancia relativa de los isótopos, normalmente a los isótopos estables. 117
- freatomagmática** Erupción en la que se produce una interacción en-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

141 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

142

Glosario

- tre el magma y el agua, sea esta meteórica, marina o subterránea. 37
- frente** Final del ramal principal o secundario de una galería. Extremo opuesto a la entrada o bocamina. 27, 91-94, 128
- félsico** Rocas y magmas ricos en sílice. Suelen presentar un color claro. Ejemplos: granito, riolita y traquita. 34, 107
- G**
- galería** Perforación subhorizontal con una longitud, por lo general, desde centenares de metros a kilómetros y con una sección estándar de 2x2 m. No presentan boca de salida y son perforadas con una ligera inclinación para que en caso de alumbramiento de agua, esta drene por gravedad hasta la bocamina (entrada). 18-20, 23, 25-28, 51, 54, 59-64, 67-69, 77-81, 83, 85, 87, 88, 90-95, 97, 125-128
- Giggenbach** Tipo de muestreo de gases volcánicos que permite la determinación de las concentraciones de las especies condensables y no condensables. En una ampolla de unos 250 mL se introduce un disolución de NaOH 4N ( $\approx$  50 mL). A continuación se le practica el vacío a la ampolla. La muestra de gas se realiza de la siguiente forma: una pica hueca o un embudo es colocado en el punto de emisión, mediante un tubo se conecta la ampolla a la salida de la pica/embudo, se abre la llave de la ampolla conectada al tubo para que el gas fluya hacia el interior. 47
- GRAFCAN** Empresa pública de la Comunidad Autónoma de Canarias que realiza actividades de producción, mantenimiento y gestión de la información geográfica y territorial en la comunidad autónoma. 76
- gravímetro** Instrumento empleado para la medición del valor del campo de la gravedad terrestre. 56
- H**
- helio cortical** Helio producido por un decaimiento radiactivo en el que se emite una partícula  $\alpha$ . Las tres principales fuentes de este tipo de helio son:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ . 21, 74, 112, 117, 121
- helio radiogénico** Ver helio cortical. 29, 111, 117
- hidrotermal** Cualquier proceso que implique la circulación de agua a poca profundidad en la corteza como resultado del calor suministrado por intrusos magma. 46, 57, 82
- hipocentro** Punto en el interior de la Tierra en donde se localiza la fuente de un terremoto o evento sísmico. 75
- Holoceno** Época geológica que pertenece al periodo Cuaternario, el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

142 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Glosario

143

cual está englobado en la era Cenozoica. Abarca los últimos 11700 años de la historia geológica del planeta. 36, 81

I

**ICP-MS** Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente. Técnica analítica de mayor potencialidad para la determinación de elementos traza y sus isótopos en todo tipo de matrices en disolución. 52

**ignimbrita** Gran cuerpo rocoso formado a partir de la deposición de piroclastos que han viajado desde el centro eruptivo como parte de un flujo piroclástico. 36

**intrusión magmática** Migración del magma bajo la superficie sin producirse erupción. Normalmente suelen ocurrir en profundidad y lo hacen adquiriendo diferentes estructuras (sills, lacolitos y diques entre otros) dependiendo del campo de esfuerzos local. 100, 115, 119-121

**intrusión marina** Movimiento permanente o temporal del agua de mar hacia el continente. 60, 65

J

**Jurásico** Periodo geológico perteneciente a la era Mesozoica con una duración comprendida entre los 201 y 145 millones de años. 32

L

**Las Cañadas del Teide** Caldera de colapso con forma elíptica y un perímetro de unos 17 km situada en el centro de Tenerife a una altura media de 2000 m. 36, 79

**litosfera** Capa formada por la corteza y la parte superior del manto. En esta capa las rocas se comportan como sólidos frágiles. 25, 39, 42, 46

**límite de detección** Es la menor cantidad de un analito cuya señal puede ser distinguida del ruido por el detector correspondiente. 55, 112

M

**magma** Roca fundida o parcialmente fundida situada a cierta profundidad bajo la superficie terrestre. 22, 25, 28, 29, 34, 37, 38, 40-42, 44-46, 75, 101, 104, 107, 115, 118-120, 123, 128

**magnetómetro** Equipo diseñado para cuantificar la intensidad y/o dirección de un campo magnético. 57

**magnitud** Magnitud definida para describir el 'tamaño' de un evento sísmico basada en las ondas sísmicas registradas por un sismómetro. 40, 42, 75, 96, 109, 121

**magnitud de completitud** Es la magnitud más baja para la cual el 100% de los eventos sísmicos son detectados. 75

**Mioceno** Época geológica que pertenece al periodo Neógeno, el cual se incluye dentro de la era

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

143 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

144

Glosario

- Cenozoica. Comenzó hace unos 23 Ma y terminó sobre los 5 Ma. 33
- Mogi** Modelo que asume la presencia de una fuente esférica para explicar la deformación de la superficie sobre una cámara de magma. 22, 44, 116
- momento sísmico** Representa el trabajo realizado por una doble pareja de fuerzas, de modo que su resultante sea cero. A partir de esta representación se generan dos planos: el plano de falla y un plano auxiliar. El momento sísmico se describe mediante un tensor de orden 2. 29, 120
- Montaña Chio** Erupción monogenética datada en  $3933 \pm 212$  CAL años BP, situada a 2200 m de altitud en el municipio de Guía de Isora en Tenerife. 81
- Montaña Cruz de Tea** Erupción monogenética datada durante el Holoceno en base a estudios estratigráficos, situada a 2100 m de altitud en el municipio de Guía de Isora en Tenerife. 81
- máxima probabilidad** Método estadístico que estima el valor de b y el límite de confianza asociado. 75
- mínimos cuadrados** Técnica de análisis numérico en la que, dados un conjunto de pares ordenados (variable independiente y dependiente) se intenta encontrar la función continua que mejor se ajuste a los datos de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. 75
- N**
- nivel freático** Corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. 65
- P**
- peligrosidad volcánica** La probabilidad de cada punto del espacio de ser afectado por los productos de una erupción durante un intervalo de tiempo considerado. 25, 35, 56
- periodo cálido** Ventana temporal en donde la temperatura externa es superior a la temperatura media en el interior de la galería Río de Guía. 19, 27, 81, 83, 87, 89, 92, 93
- periodo frío** Ventana temporal en donde la temperatura externa es inferior a la temperatura media en el interior de la galería Río de Guía. 19, 27, 81, 83, 86–88, 90–92
- Pico Viejo** O Montaña Chahorra. Es el segundo estratovolcán más alto de Canarias tras el Teide con 3135 m s.n.m. y está situado al oeste de este en el flanco norte de La Caldera de Las Cañadas en Tenerife. Junto al Teide forma el complejo volcánico Teide-Pico Viejo. 38, 79, 91, 128
- piroclastos** Fragmentos de magma solidificados en algún momento de la erupción, generalmente durante su recorrido aéreo. Se incluyen las cenizas, lapilli (pición) y bombas volcánicas. 35

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

144 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

144 / 229

Glosario

145

- placa africana** Placa tectónica que cubre el continente africano extendiéndose hacia el oeste hasta la dorsal mesoatlántica. 32, 33
- pluma** Mezcla de partículas volcánicas, principalmente cenizas y gases, con aire atmosférico que puede inyectarse en altos niveles en la atmósfera y dispersarse a escala global. Su estructura y comportamiento están controlados por factores como la composición magmática, la cantidad y la naturaleza de los componentes volátiles, la tasa de descarga de magma y la geometría de la fuente de ventilación. 46, 54, 55
- pluma mantélica** Parte del manto donde la flotabilidad hace que las rocas en estado de fusión parcial se eleven hacia la superficie. 107, 111, 116
- potencial espontáneo** Diferencia de potencial eléctrico natural en la Tierra medida por un electrodo en relación con otro de referencia y fijo. Este potencial se crea por separación de cargas en arcillas u otros minerales por la presencia de una capa semipermeable que impide la difusión de iones a través de los poros de la roca o por flujos de fluidos (principalmente agua). En volcanología, esta diferencia es medida a lo largo de la superficie con el fin de identificar elementos estructurales (fracturas, fisuras y fallas por ejemplo) y para el estudio de sistemas hidrotermales. 57, 127
- pozo** Pozo canario que se diferencia de uno estándar por su diámetro, que puede superar fácilmente los 3.5 m y con unas profundidades comprendidas, por lo general, entre los 20 y 30 m. 18–20, 23, 25–29, 51, 59, 60, 63–65, 67–70, 77, 95, 97, 125–127
- presión litostática** Presión a una profundidad dada bajo la superficie debido al peso de las capas de roca superiores. 44
- PT100** Tipo específico de detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia) fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C. 69, 72
- R**
- red sísmica** Conjunto de estaciones sísmicas distribuidos en una amplia región y que registran el movimiento del suelo de forma sincronizada. A partir de la combinación de los registros de todas las estaciones que forman parte de la red es posible tanto detectar terremotos como localizarlos. 42, 96, 107
- regresión lineal múltiple** Método matemático que trata de ajustar modelos lineales o linealizables entre una variable dependiente y más de una variables independientes. 71

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

145 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

146

Glosario

- reservorio** Región que contiene roca fundida y que puede extenderse desde la zona de generación principal de magma hasta la superficie. Este depósito puede contener: roca fundida o parcialmente fundida (magma), gases magmáticos, y roca sólida que incluso puede llegar a compartimentar el reservorio. 44, 46, 75, 119, 120
- riesgo volcánico** Es la expectativa de pérdidas o daños debidos a la actividad volcánica. 25, 26, 31, 39, 56, 126
- Roque del Conde** Uno de los tres volcanes en escudo que se crearon durante las primeras etapas evolutivas de la isla de Tenerife. Actualmente, está presente como un macizo erosionado en el sur de la isla. 78
- Río de Guía** Galería de un solo ramal situada en el flanco oeste de Tenerife con dirección aproximada oeste-este, cota de 1820 m y longitud de 3150 m. 26, 71, 74, 128
- S**
- S** Onda elástica transversal (fase S). Es el segundo tipo de señal en ser registrada en un sismómetro tras la ocurrencia de un evento sísmico. 21, 40–42, 74, 75, 109, 110, 121
- sondeo** Perforación vertical por medios mecánicos con un diámetro inferior a 1.5 m pudiendo alcanzar grandes profundidades. 18, 29, 51, 60, 66–68, 77, 107, 125–127
- subsidiencia** Hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina, por el peso de las capas superiores, apilamiento de materiales sedimentarios y/o volcánicos. 35
- T**
- tabla de agua** Nivel freático. 97
- Tacorón** Galería en trancada situada al sur de la isla de El Hierro a una cota de 40 m s.n.m. y con una profundidad de 1510 m. 71
- Teide** Es el mayor estratovolcán de Canarias (3715 m s.n.m.) y la cima más alta de España. Desde el fondo oceánico tiene una altura de unos 7000 m lo que lo convierte en el tercer edificio volcánico más alto del mundo. Se encuentra en el flanco norte de La Caldera de Las Cañadas en Tenerife al este del estratovolcán Pico Viejo o Montaña Chahorra. Ambos forman el complejo volcánico Teide-Pico Viejo. El Teide comenzó su formación hace unos 120 ka presentando una compleja evolución en la que se han producido eventos eruptivos de magmas muy evolucionados. La última erupción ha sido datada hace unos 1150 años, Lavas Negras. 17, 35, 38, 44, 79, 117, 128
- Teno** Uno de los tres volcanes en escudo que se crearon durante las primeras etapas evolutivas de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

146 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

146 / 229

Glosario

147

la isla de Tenerife. Actualmente, está presente como un macizo erosionado en el noroeste de la isla. 78

**Terciario** Actualmente denominada como era Cenozoica comenzó hace unos 66 Ma y se extiende hasta la actualidad. 33

**Tigirote** Galería convencional situada en el flanco este de la isla de El Hierro a una cota de 480 m s.n.m y una profundidad de unos 1000 m . 71

**Tincos** Galería convencional situada en el norte de la isla de El Hierro (El Golfo) a una cota de 370 m s.n.m y una profundidad de unos 1000 m . 71

**tomografía de resistividad eléctrica** En esta técnica se inyecta una corriente en el subsuelo mediante un par de electrodos y se registra la respuesta del medio mediante la diferencia de potencial a través de otro par de electrodos llamados de potencial. La distribución del potencial eléctrico permite la reconstrucción de la resistividad eléctrica asociada a los diferentes materiales o litologías que conforman el subsuelo. 57

**traquita** Roca volcánica de carácter ácido (rica en sílice) y de color claro compuesta principalmente de feldespatos alcalinos. 34, 79

**tubos Geiger** Instrumento que permite medir la radiactividad. Dispone de un tubo con un gas que se ioniza al paso de la radiación. 70

## U

**unrest** Periodo de tiempo en el que algún parámetro que describe la actividad volcánica (sismicidad, deformación del terreno y emisión gaseosa, por ejemplo) muestran incrementos respecto a sus niveles base sugiriendo un cambio en el estado de actividad del sistema volcánico. 26, 28, 39, 42

## V

**ventilación natural** Hace referencia al flujo de aire externo a un espacio interior como resultado de las diferencias de presión. Existen dos tipos de ventilación natural, la producida por diferencias de presión y la generada por diferencias de temperatura. 88, 90–93

**viscosidad** Propiedad de un fluido que describe su resistencia a la deformación y al flujo cuando se le aplica estrés. 104

**volumetría** Método de análisis químico cuantitativo en el que se determina la concentración desconocida de una especie o compuesto a partir del volumen consumido de un reactivo de concentración conocida. 52

**volátiles** En general cualquier compuesto químico con un bajo punto de ebullición. En vulcanología se emplea para referirse a los gases comúnmente disueltos en el magma. 25, 44, 46, 128

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

147 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

148

Glosario

X

**xenolitos** Fragmentos de roca que el magma ha incluido durante su ascenso o el emplazamiento. Representan material sólido completamente ajeno al magma cuya procedencia suele ser la roca de caja. 32, 34

**xenolitos peridotíticos** Xenolito con origen en el manto superior. 120

Z

**zero phase** Tipo de filtro en el que no se imprime un cambio de fase a la señal filtrada puesto que el filtrado se realiza en las dos direcciones. 20, 22, 71, 99, 114, 115

**zona saturada** Parte del subsuelo que se encuentra por debajo de la superficie freática y en la que todos los poros o fisuras están llenos de agua. 62, 64

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

148 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

148 / 229

## Bibliografía

- A Aiuppa, C Federico, G Giudice, and S Gurrieri. Chemical mapping of a fumarolic field: la Fossa crater, Vulcano Island (Aeolian Islands, Italy). *Geophysical Research Letters*, 32(13), 2005.
- Alessandro Aiuppa, Roberto Moretti, Cinzia Federico, Gaetano Giudice, Marco Liuzzo, Sergio Gurrieri, Paolo Papale, Hiroshi Shinohara, and Mariano Valenza. Forecasting Etna eruptions by real-time observation of volcanic gas composition. *Geology*, 35(12):1115–1118, December 2007. doi: 10.1130/G24149A.1.
- Alessandro Aiuppa, Cinzia Federico, Gaetano Giudice, Giovanni Giuffrida, Roberto Guida, Sergio Gurrieri, Marco Liuzzo, Roberto Moretti, and Paolo Papale. The 2007 eruption of Stromboli volcano: insights from real-time measurement of the volcanic gas plume CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> ratio. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(3-4):221–230, 2009.
- K. Aki. Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43:237–239, 1965.
- Helena Albert, Fidel Costa, and Joan Martí. Timing of Magmatic Processes and Unrest Associated with Mafic Historical Monogenetic Eruptions in Tenerife Island. *Journal of Petrology*, 56(10):1945–1966, November 2015. doi: 10.1093/petrology/egv058.
- J. F. Albert-Beltrán, V. Araña, J. L. Díez, and A. Valentin. Physical-chemical conditions of the Teide volcanic system (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43(1):321 – 332, 1990. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90059-O](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90059-O).
- Javier Almendros, Jesús M. Ibáñez, Enrique Carmona, and Daria Zandomenghi. Array analyses of volcanic earthquakes and tremor recorded at Las Cañadas caldera (Tenerife Island, Spain) during the 2004 seismic activation of Teide volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(3):285–299, February 2007. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.10.002.

149

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

149 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

149 / 229

150

BIBLIOGRAFÍA

Francisco Javier Almendros González et al. *Análisis de señales simo-volcánicas mediante técnicas de array*. Universidad de Granada, 2002.

Héctor Alonso, Tatiana Cruz-Fuentes, Jesús G Rubiano, Jonay González-Guerra, María Del Carmen Cabrera, Miguel A Arnedo, Alicia Tejera, Alejandro Rodríguez-Gonzalez, Francisco J Pérez-Torrado, and Pablo Martel. Radon in groundwater of the northeastern Gran Canaria aquifer. *Water*, 7(6):2575–2590, 2015.

Zuheir Altamimi, Paul Reischung, Laurent Métivier, and Xavier Collilieux. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8):6109–6131, August 2016. doi: 10.1002/2016JB013098.

Eumenio Ancochea, Francisco Hernán, Antonio Cendrero, Jean Marie Cantagrel, José María Fúster, Elisa Ibarrola, and Juan Coello. Constructive and destructive episodes in the building of a young Oceanic Island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60(3):243–262, May 1994. doi: 10.1016/0377-0273(94)90054-X.

F Anguita and F Hernán. A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 27(1):11–19, 1975.

Francisco Anguita and F Hernán. The Canary Islands origin: a unifying model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4):1–26, 2000.

V Araña and R Ortiz. Marco geodinámico del volcanismo canario. *Anales de física. Serie B, Aplicaciones, métodos e instrumentos*, 82:202–231, 1986.

V Araña and R Ortiz. The Canary Islands: Tectonics, magmatism and geodynamic framework. In *Magmatism in extensional structural settings*, pages 209–249. Springer, 1991.

V Araña and JM Fuster. La erupción del volcán Teneguía, La Palma, Islas Canarias. *Estudios Geol*, pages 15–18, 1974.

V Araña, A.G Camacho, A García, F.G Montesinos, I Blanco, R Vieira, and A Felpeto. Internal structure of Tenerife (Canary Islands) based on gravity, aeromagnetic and volcanological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1):43–64, December 2000. doi: 10.1016/S0377-0273(00)00215-8.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

150 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

151

María Aurora Armienta, Servando De la Cruz-Reyna, Silvia Ramos, Nora Cenicerros, Olivia Cruz, Alejandra Aguayo, and Flor Arcega-Cabrera. Hydrogeochemical surveillance at El Chichón volcano crater lake, Chiapas, Mexico. *Journal of volcanology and geothermal research*, 285:118–128, 2014.

Aw-El Aware Electronics. RM70 Specifications, 2018. URL <http://aw-el.net/specs.htm>.

Benedetto Badalamenti, Nicola Bruno, Tommaso Caltabiano, Fabio Di Gangi, Salvatore Giammanco, and Giuseppe Salerno. Continuous soil CO<sub>2</sub> and discrete plume SO<sub>2</sub> measurements at mt. Etna (Italy) during 1997–2000: a contribution to volcano monitoring. *Bulletin of volcanology*, 66(1):80–89, 2004.

Chris J. Ballentine, Ray Burgess, and Bernard Marty. Tracing Fluid Origin, Transport and Interaction in the Crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1):539–614, January 2002. doi: 10.2138/rmg.2002.47.13.

S. Barde-Cabusson, A. Finizola, A. Revil, T. Ricci, S. Piscitelli, E. Rizzo, B. Angeletti, M. Balasco, L. Bennati, S. Byrdina, N. Carzaniga, A. Crespy, F. Di Gangi, J. Morin, A. Perrone, M. Rossi, E. Roulleau, B. Suski, and N. Villeneuve. New geological insights and structural control on fluid circulation in La Fossa cone (Vulcano, Aeolian Islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(3):231–245, August 2009. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.06.002.

Abigail K. Barker, Valentin R. Troll, Juan Carlos Carracedo, and Peter A. Nicholls. The magma plumbing system for the 1971 Teneguía eruption on La Palma, Canary Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5): 54, November 2015. doi: 10.1007/s00410-015-1207-7.

L. Becerril, J. P. Galve, J. M. Morales, C. Romero, N. Sánchez, J. Martí, and I. Galindo. Volcano-structure of El Hierro (Canary Islands). *Journal of Maps*, 12(sup1):43–52, November 2016. doi: 10.1080/17445647.2016.1157767.

Bernice Bender. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3):831–851, June 1983.

Isabel Blanco-Montenegro, Iacopo Nicolosi, Alessandro Pignatelli, and Massimo Chiappini. Magnetic imaging of the feeding system of oceanic volcanic islands: El Hierro (Canary Islands). *Geophysical Journal International*, 173(1):339–350, 2008.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

151 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

152

BIBLIOGRAFÍA

- E Bosshard and DJ MacFarlane. Crustal structure of the western Canary Islands from seismic refraction and gravity data. *Journal of Geophysical Research*, 75 (26):4901–4918, 1970.
- N Bruno, T Caltabiano, and R Romano. SO<sub>2</sub> emissions at mt. Etna with particular reference to the period 1993–1995. *Bulletin of Volcanology*, 60(6):405–411, 1999.
- L. Brusca, A. Aiuppa, W. D'Alessandro, F. Parello, P. Allard, and A. Michel. Geochemical mapping of magmatic gas–water–rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1):199–218, August 2001. doi: 10.1016/S0377-0273(00)00286-9.
- Mike Burton, Patrick Allard, Filippo Muré, and Alessandro La Spina. Magmatic gas composition reveals the source depth of slug-driven strombolian explosive activity. *Science*, 317(5835):227–230, 2007. doi: 10.1126/science.1141900. URL <https://science.sciencemag.org/content/317/5835/227>.
- E.Fernández Caldas and V.Pérez García. The subterranean waters of Tenerife—i: Origin and chemical characteristics. *Talanta*, 16(7):1067 – 1078, 1969. doi: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(69\)80142-6](https://doi.org/10.1016/0039-9140(69)80142-6).
- El Diario Canarias Ahora. Canarias Ahora Sociedad - eldiario.es, February 2007. URL [https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/muertos-vieja-galeria-agua-silos\\_1\\_4848473.html](https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/muertos-vieja-galeria-agua-silos_1_4848473.html). Library Catalog: [www.eldiario.es](http://www.eldiario.es) Section: Sociedad.
- G Capasso, W D'Alessandro, R Favara, S Inguaggiato, and F Parello. Interaction between the deep fluids and the shallow groundwaters on Vulcano Island (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1-4):187–198, 2001.
- G. Capasso, M. L. Carapezza, C. Federico, S. Inguaggiato, and A. Rizzo. Geochemical monitoring of the 2002–2003 eruption at Stromboli volcano (Italy): precursory changes in the carbon and helium isotopic composition of fumarole gases and thermal waters. *Bulletin of Volcanology*, 68(2):118–134, December 2005. doi: 10.1007/s00445-005-0427-5.
- Maria Luisa Carapezza, Salvatore Inguaggiato, Lorenzo Brusca, and Manfredi Longo. Geochemical precursors of the activity of an open-conduit volcano: The Stromboli 2002–2003 eruptive events. *Geophysical Research Letters*, 31 (7), April 2004. doi: 10.1029/2004GL019614.
- Maria Luisa Carapezza, Tullio Ricci, Massimo Ranaldi, and Luca Tarchini. Active degassing structures of Stromboli and variations in diffuse CO<sub>2</sub> output related

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

152 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

153

- to the volcanic activity. *The 2007 Eruption of Stromboli*, 182(3):231–245, May 2009. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.08.006.
- J. C. Carracedo, S. Day, H. Guillou, E. Rodríguez Badiola, J. A. Canas, and F. J. Pérez Torrado. Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, 135(5):591–604, 1998a. doi: 10.1017/S0016756898001447.
- J. C. Carracedo, Simon J. Day, Hervé Guillou, and Philip Gravestock. Later stages of volcanic evolution of La Palma, Canary Islands: Rift evolution, giant landslides, and the genesis of the Caldera de Taburiente. *GSA Bulletin*, 111(5): 755–768, May 1999. doi: 10.1130/0016-7606(1999)111<0755:LSOVEO>2.3.CO;2.
- J.C. Carracedo, E. R. Badiola, H. Guillou, J. de la Nuez, and F. J. Pérez Torrado. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57(5-6):175–273, 2001. doi: 10.3989/egool.01575-6134.
- J.C. Carracedo, E. Rodríguez Badiola, H. Guillou, M. Paterne, S. Scaillet, F.J. Pérez Torrado, R. Paris, U. Fra-Paleo, and A. Hansen. Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *GSA Bulletin*, 119(9-10):1027, 2007. doi: 10.1130/B26087.1.
- J.C. Carracedo, H. Guillou, S. Nomade, E. Rodríguez-Badiola, F.J. Pérez-Torrado, A. Rodríguez-González, R. Paris, V.R. Troll, S. Wiesmaier, A. Delcamp, and J.L. Fernández-Turiel. Evolution of ocean-island rifts: The northeast rift zone of Tenerife, Canary Islands. *GSA Bulletin*, 123(3-4):562–584, March 2011. doi: 10.1130/B30119.1.
- Juan Carlos Carracedo and Valentin R Troll. *Teide Volcano: Geology and Eruptions of a Highly Differentiated Oceanic Stratovolcano*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Juan Carlos Carracedo, Si Day, Hervé Guillou, E Rodríguez Badiola, JA Canas, and FJ Pérez Torrado. Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, 135(5):591–604, 1998b.
- G. Chiodini, R. Cioni, M. Guidi, B. Raco, and L. Marini. Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5):543 – 552, July 1998. doi: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0).
- G. Chiodini, F. Frondini, C. Cardellini, D. Granieri, L. Marini, and G. Ventura. CO<sub>2</sub> degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

153 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

154

BIBLIOGRAFÍA

*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B8):16213–16221, 2001.  
doi: 10.1029/2001JB000246.

G. Chiodini, S. Caliro, C. Cardellini, R. Avino, D. Granieri, and A. Schmidt.  
Carbon isotopic composition of soil CO<sub>2</sub> efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO<sub>2</sub> degassing in volcanic-hydrothermal areas. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3):372–379, October 2008.  
doi: 10.1016/j.epsl.2008.07.051.

C. Cigolini, P. Poggi, M. Ripepe, M. Laiolo, C. Ciamberlini, D. Delle Donne, G. Ulivieri, D. Coppola, G. Lacanna, E. Marchetti, D. Piscopo, and R. Genco.  
Radon surveys and real-time monitoring at Stromboli volcano: Influence of soil temperature, atmospheric pressure and tidal forces on <sup>222</sup>Rn degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3):381 – 388, 2009.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.019>.

CAEH Consejo Insular de Aguas de El Hierro. Página web, 2020. URL <https://www.aguaselhierro.org/>.

CIAFV Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura. Página web, 2020. URL <https://www.aguasfuerteventura.com/>.

CIAGC Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Página web, 2020. URL <https://www.aguasgrancanaria.com/>.

CIALG Consejo Insular de Aguas de La Gomera. Página web, 2020. URL <https://www.aguasgomera.es/>.

CIALP Consejo Insular de Aguas de La Palma. Página web, 2020. URL <https://www.lapalmaaguas.com/>.

CIALZ Consejo Insular de Aguas de Lanzarote. Página web, 2020. URL <https://www.aguaslanzarote.com/>.

CIATF Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Plan hidrológico de tenerife, 2015.

CIATF Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Página web, 2020. URL <https://www.aguastenerife.org/>.

R Dach, F Andritsch, D Arnold, Stefano Bertone, Pierre Fridez, A Jäggi, Y Jean, Andrea Maier, L Mervart, Ulrich Meyer, E Orliac, E Ortiz- Geist, L Prange, S Scaramuzza, S Schaer, Dmitry Sidorov, Andreja Susnik, A Villiger, P Walsler, and Daniela Thaller. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. November 2015. ISBN 978-3-906813-05-9. doi: 10.7892/boris.72297.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

154 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

154 / 229

BIBLIOGRAFÍA

155

- Debabrata Das and T.Nejat Veziroğlu. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26 (1):13–28, January 2001. doi: 10.1016/S0360-3199(00)00058-6.
- James M.D. Day and David R. Hilton. Origin of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in HIMU-type basalts constrained from Canary Island lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(1):226–234, May 2011. doi: 10.1016/j.epsl.2011.03.006.
- J. J. Dañobeitia, Agustín Udías Vallina, and Astronomía y Astrofísica I. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Física de la Tierra. *Estudio geofísico submarino en el area del Archipiélago Canario*. PhD thesis, 1985.
- Sofia De Gregorio, Marco Camarda, Manfredi Longo, Santo Cappuzzo, Gaetano Giudice, and Sergio Gurrieri. Long-term continuous monitoring of the dissolved  $\text{CO}_2$  performed by using a new device in groundwater of the mt. Etna (southern italy). *Water research*, 45(9):3005–3011, 2011.
- Carmen del Fresno, Itahiza Domínguez Cerdeña, Simone Cesca, and Elisa Buforn. The 8 October 2011 Earthquake at El Hierro (Mw 4.0): Focal Mechanisms of the Mainshock and Its Foreshocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1):330–340, December 2014. doi: 10.1785/0120140151.
- W Martinez del Olmo and JB Buitrago. Sedimentación y volcanismo al este de las islas de Fuerteventura y Lanzarote (Surco de Fúster Casas). *Geogaceto*, 32:51–54, 2002.
- Santo La Delfa, Ivan Agostino, Daniela Morelli, and Giuseppe Patanè. Soil radon concentration and effective stress variation at Mt. Etna (Sicily) in the period January 2003–April 2005. *Radiation Measurements*, 43(7):1299 – 1304, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.02.004>.
- Charles DeMets, Richard G. Gordon, Donald F. Argus, and Seth Stein. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20):2191–2194, October 1994. doi: 10.1029/94GL02118.
- Richard G. Derwent, Peter G. Simmonds, Simon J. O’Doherty, Alistair J. Manning, and T. Gerard Spain. A 24-year record of high-frequency, in situ, observations of hydrogen at the Atmospheric Research Station at Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, 203:28–34, April 2019. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.050.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

155 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

156

BIBLIOGRAFÍA

- Daniel Dzurisin. *Volcano deformation: new geodetic monitoring techniques*. Springer Science & Business Media, 2006.
- Walter D'Alessandro and Fabio Vita. Groundwater radon measurements in the mt. Etna area. *Journal of environmental radioactivity*, 65(2):187–201, 2003.
- Amos Ecker. Groundwater behaviour in Tenerife, volcanic island (Canary Islands, Spain). *Journal of Hydrology*, 28(1):73 – 86, 1976. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90053-6).
- M Edmonds, RA Herd, B Galle, and CM Oppenheimer. Automated, high time-resolution measurements of SO<sub>2</sub> flux at Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bulletin of Volcanology*, 65(8):578–586, 2003.
- A. Eff-Darwich, C. Martín-Luis, M. Quesada, J. de la Nuez, and J. Coello. Variations on the concentration of <sup>222</sup>Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 29(22):26–1, November 2002. doi: 10.1029/2002GL015387.
- Antonio Eff-Darwich, Ronaldo Viñas, Vicente Soler, Julio de la Nuez, and Maria L. Quesada. Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring. *Radiation Measurements*, 43(8):1429 – 1436, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.05.006>.
- Jiří Faimon, Dana Troppová, Vít Baldík, and Roman Novotný. Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *International Journal of Climatology*, 32(4):599–623, February 2011. doi: 10.1002/joc.2298.
- S. Falsaperla, M. Neri, G. Di Grazia, H. Langer, and S. Spampinato. What happens to in-soil Radon activity during a long-lasting eruption? Insights from Etna by multidisciplinary data analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(6):2162–2176, June 2017. doi: 10.1002/2017GC006825.
- I Farrujia. *Informe hidrogeológico galería Rí de Guía (Vol. Planificación Hidráulica del Cabildo de Tenerife)*. Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 1989.
- Anthony Finizola, Francesco Sortino, Jean-François Lénat, and Mariano Valenza. Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO<sub>2</sub> surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1):1 – 18, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00327-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00327-4).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

156 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

157

Karsten Galipp, Andreas Klügel, and Thor H. Hansteen. Changing depths of magma fractionation and stagnation during the evolution of an oceanic island volcano: La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155(3):285–306, July 2006. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.04.002.

Martin J. R. Gee, Anthony B. Watts, Douglas G. Masson, and Neil C. Mitchell. Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands. *Marine Geology*, 177(3):271 – 293, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00153-0).

S. Giammanco, K. W. W. Sims, and M. Neri. Measurements of  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CO}_2$  emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(10), October 2007. doi: 10.1029/2007GC001644.

Salvatore Giammanco, Sergio Gurrieri, and Mariano Valenza. Geochemical investigations applied to active fault detection in a volcanic area: the north-east rift on mt. Etna (Sicily, Italy). *Geophysical Research Letters*, 26(13):2005–2008, 1999. doi: 10.1029/1999GL900396.

WF Giggenbach. A simple method for the collection and analysis of volcanic gas samples. *Bulletin volcanologique*, 39(1):132–145, 1975.

Gobierno de Canarias. El Comité Científico del PEVOLCA da por finalizada la erupción submarina que se inició en octubre en El Hierro, 2012. URL <https://tinyurl.com/yyo6owpw>.

GobCan Gobierno de Canarias. B.o.c. 246, de 10.12.2008, 2008. URL <https://www.gobiernodecanarias.org/libroazul/pdf/60177.pdf>.

Pablo J. González, Sergey V. Samsonov, Susi Pepe, Kristy F. Tiampo, Pietro Tizzani, Francesco Casu, José Fernández, Antonio G. Camacho, and Eugenio Sansosti. Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: Implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8):4361–4377, 2013. doi: 10.1002/jgrb.50289.

GRAFCAN. Estaciones GNSS de Canarias, 2019. URL <https://idecan2.grafcan.es>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

157 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

158

BIBLIOGRAFÍA

- David Graham. Noble gases in MORB and OIB: observational constraints for the characterization of mantle source reservoirs. *Rev. Mineral. Geochem.*, 46: 247–318, January 2002.
- D Granieri, G Chiodini, W Marzocchi, and R Avino. Continuous monitoring of CO<sub>2</sub> soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1): 167–179, July 2003. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00232-2.
- A. Gregorič, A. Zidanšek, and J. Vaupotič. Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5):1523–1528, 2011. doi: 10.5194/nhess-11-1523-2011.
- Hervé Guillou, Juan Carracedo, Raphaël Paris, and Francisco Torrado. Implications for early shield-stage evolution of tenerife from k/ar ages and magnetic stratigraphy. *Earth and Planetary Science Letters*, 222:599–614, 05 2004. doi: 10.1016/j.epsl.2004.03.012.
- Hans Magnus Hausen. *Some Contributions to the Geology of La Palma (Canary Islands) & Hans Hausen*. Soc. Scientiarum Fennica, 1969.
- Jens Havskov and Gerardo Alguacil. *Instrumentation in earthquake seismology*, volume 358. Springer, 2004.
- P. Hernández, N. Pérez, J. Salazar, M. Sato, K. Notsu, and H. Wakita. Soil gas CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub> distribution in and around Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1):425 – 438, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00235-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00235-3).
- Pedro A. Hernández, Germán Padilla, José Barrancos, Gladys Melián, Eleazar Padrón, María Asensio-Ramos, Fátima Rodríguez, Nemesio Pérez, Mar Alonso, and David Calvo. Geochemical evidences of seismo-volcanic unrests at the NW rift zone of Tenerife, Canary Islands, inferred from diffuse CO<sub>2</sub> emission. *Bulletin of Volcanology*, 79(4):30, April 2017. doi: 10.1007/s00445-017-1109-9.
- D.R Hilton, C.G Macpherson, and T.R Elliott. Helium isotope ratios in mafic phenocrysts and geothermal fluids from La Palma, the Canary Islands (Spain): implications for HIMU mantle sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (12):2119–2132, June 2000. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00358-6.
- J. M. Ibáñez, S. De Angelis, A. Díaz-Moreno, P. Hernández, G. Alguacil, A. Posadas, and N. Pérez. Insights into the 2011–2012 submarine eruption off the

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

158 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

159

coast of El Hierro (Canary Islands, Spain) from statistical analyses of earthquake activity. *Geophysical Journal International*, 191(2):659–670, November 2012. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05629.x.

Instituto Geográfico Nacional IGN. Instituto Geográfico Nacional, 2019.

S Inguaggiato, Y Taran, F Grassa, G Capasso, R Favara, N Varley, and E Faber. Nitrogen isotopes in thermal fluids of a forearc region (Jalisco Block, Mexico): Evidence for heavy nitrogen from continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(12), 2004.

Salvatore Inguaggiato, Lorenzo Calderone, Claudio Inguaggiato, Sabina Morici, and Fabio Vita. Dissolved CO<sub>2</sub> in natural waters: development of an automated monitoring system and first application to Stromboli volcano (Italy). *Annals of Geophysics*, 54(2), 2011.

Salvatore Inguaggiato, Lorenzo Calderone, Claudio Inguaggiato, Agnes Mazot, Sabina Morici, and Fabio Vita. Long-time variation of soil CO<sub>2</sub> fluxes at the summit crater of vulcano (italy). *Bulletin of volcanology*, 74(8):1859–1863, 2012.

Salvatore Inguaggiato, Iole Serena Diliberto, Cinzia Federico, Antonio Paonita, and Fabio Vita. Review of the evolution of geochemical monitoring, networks and methodologies applied to the volcanoes of the Aeolian Arc (italy). *Earth-Science Reviews*, 176:241–276, 2018.

Estadísticas de la Comunidad Autónoma de Canarias ISTAC. ISTAC: Estadísticas de la Comunidad Autónoma de Canarias, 2020. URL <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:ccdf465c-2230-421d-99f6-d6a1669d6032>.

Takamori Ito, Koichiro Nagamine, Koshi Yamamoto, Mamoru Adachi, and Iwao Kawabe. Preseismic hydrogen gas anomalies caused by stress-corrosion process preceding earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 26(13):2009–2012, July 1999. doi: 10.1029/1999GL900407.

Mark S Johnson, Michael F Billett, Kerry J Dinsmore, Marcus Wallin, Kirstie E Dyson, and Rachhpal S Jassal. Direct and continuous measurement of dissolved carbon dioxide in freshwater aquatic systems—method and applications. *Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology*, 3(1):68–78, 2010.

A Klügel, H.-U Schmincke, J.D.L White, and K.A Hoernle. Chronology and volcanology of the 1949 multi-vent rift-zone eruption on La Palma (Canary

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

159 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

160

BIBLIOGRAFÍA

Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1):267 – 282, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00107-9).

Andreas Klügel. Reactions between mantle xenoliths and host magma beneath La Palma (Canary Islands): constraints on magma ascent rates and crustal reservoirs. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 131(2):237–257, April 1998. doi: 10.1007/s004100050391.

Andreas Klügel, Kaj A. Hoernle, Hans-Ulrich Schmincke, and James D. L. White. The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3):5997–6016, March 2000. doi: 10.1029/1999JB900334.

Andreas Klügel, Thor H. Hansteen, and Karsten Galipp. Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1):211 – 226, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.006>.

Andrew S. Kowalski and Enrique Pérez Sánchez-Cañete. A New Definition of the Virtual Temperature, Valid for the Atmosphere and the CO<sub>2</sub>-Rich Air of the Vadose Zone. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8): 1692–1695, June 2010. doi: 10.1175/2010JAMC2534.1.

M. Laiolo, M. Ranaldi, L. Tarchini, M.L. Carapezza, D. Coppola, T. Ricci, and C. Cigolini. The effects of environmental parameters on diffuse degassing at Stromboli volcano: Insights from joint monitoring of soil CO<sub>2</sub> flux and radon activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 315:65–78, April 2016. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.004.

Marco Liuzzo, Sergio Gurrieri, Gaetano Giudice, and Giovanni Giuffrida. Ten years of soil CO<sub>2</sub> continuous monitoring on Mt. Etna: Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8):2886–2899, June 2013. doi: 10.1002/ggge.20196.

Marc-Antoine Longpré, Andreas Klügel, Alexander Diehl, and John Stix. Mixing in mantle magma reservoirs prior to and during the 2011–2012 eruption at El Hierro, Canary Islands. *Geology*, 42(4):315–318, April 2014. doi: 10.1130/G35165.1.

Ilia Louban, Nicole Bobrowski, Dmitri Rouwet, Salvatore Inguaggiato, and Ulrich Platt. Imaging doas for volcanological applications. *Bulletin of volcanology*, 71(7):753–765, 2009.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

160 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilár  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

160 / 229

BIBLIOGRAFÍA

161

- J. B. Lowenstern, W. C. Evans, D. Bergfeld, and A. G. Hunt. Prodigious degassing of a billion years of accumulated radiogenic helium at Yellowstone. *Nature*, 506:355, February 2014.
- Florent Lyard, Fabien Lefevre, Thierry Letellier, and Olivier Francis. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5):394–415, December 2006. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- C. López, M. J. Blanco, R. Abella, B. Brenes, V. M. Cabrera Rodríguez, B. Casas, I. Domínguez Cerdeña, A. Felpeto, M. Fernández de Villalta, C. del Fresno, O. García, M. J. García-Arias, L. García-Cañada, A. Gomis Moreno, E. González-Alonso, J. Guzmán Pérez, I. Iribarren, R. López-Díaz, N. Luengo-Oroz, S. Meletlidis, M. Moreno, D. Moure, J. Pereda de Pablo, C. Rodero, E. Romero, S. Sainz-Maza, M. A. Sentre Domingo, P. A. Torres, P. Trigo, and V. Villasante-Marcos. Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption. *Geophysical Research Letters*, 39(13):n/a–n/a, 2012. doi: 10.1029/2012GL051846.
- Carmen López, Laura García-Cañada, Joan Martí, and Itahiza Domínguez Cerdeña. Early signs of geodynamic activity before the 2011–2012 El Hierro eruption. *Journal of Geodynamics*, 104:1 – 14, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.12.005>.
- Paolo Madonia, Andrea L Rizzo, Iole S Diliberto, and Rocco Favara. Continuous monitoring of fumarole temperatures at Mount Etna (Italy). *Journal of volcanology and geothermal research*, 257:12–20, 2013.
- Rayco Marrero, Dina L. López, Pedro A. Hernández, and Nemesio M. Pérez. Carbon Dioxide Discharged through the Las Cañadas Aquifer, Tenerife, Canary Islands. In Nemesio M. Pérez, Sergio Gurreri, Chi-Yu King, and Yuri Taran, editors, *Terrestrial Fluids, Earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume III*, pages 147–172. Birkhäuser Basel, Basel, 2008. ISBN 978-3-7643-8738-9. doi: 10.1007/978-3-7643-8738-9\_10.
- Rayco Marrero-Diaz, Dina López, Nemesio M Perez, Emilio Custodio, Hirochika Sumino, Gladys V Melián, Eleazar Padrón, Pedro A Hernandez, David Calvo, José Barrancos, et al. Carbon dioxide and helium dissolved gases in groundwater at central tenerife island, canary islands: chemical and isotopic characterization. *Bulletin of volcanology*, 77(10):86, 2015.
- María Candelaria Martin. *Variacion espacio-temporal del nivel de emision de radon en una zona volcanica activa: Tenerife (Islas Canarias)*. PhD thesis, PhD thesis, University of La Laguna, de La Laguna, Spain, 1999.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

161 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

- M.C. Martín-Luis, G. Steinitz, V. Soler, M.L. Quesada, and R. Casillas. <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub> at Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *The European Physical Journal Special Topics*, 224(4):641–657, May 2015. doi: 10.1140/epjst/e2015-02397-7.
- J. Martí, Carmen López, Stefania Bartolini, Laura Becerril, and Adelina Geyer. Stress Controls of Monogenetic Volcanism: A Review. *Frontiers in Earth Science*, 4:106, 2016. doi: 10.3389/feart.2016.00106.
- J. Martí, A. Villaseñor, A. Geyer, C. López, and A. Tryggvason. Stress barriers controlling lateral migration of magma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 7:40757, January 2017.
- Joan Martí, Antonio Castro, Carmen Rodríguez, Fidel Costa, Sandra Carrasquilla, Rocío Pedreira, and Xavier Bolos. Correlation of Magma Evolution and Geophysical Monitoring during the 2011–2012 El Hierro (Canary Islands) Submarine Eruption. *Journal of Petrology*, 54(7):1349–1373, July 2013a. doi: 10.1093/petrology/egt014.
- Joan Martí, Virginie Pinel, Carmen López, Adelina Geyer, Rafael Abella, Marta Tárraga, María José Blanco, Antonio Castro, and Carmen Rodríguez. Causes and mechanisms of the 2011–2012 El Hierro (Canary Islands) submarine eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(3):823–839, 2013b. doi: 10.1002/jgrb.50087.
- C. Martín-Luis, M. Quesada, A. Eff-Darwich, J. De la Nuez, J. Coello, A. Ahijado, R. Casillas, and V. Soler. A new strategy to measure radon in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands). *Environmental Geology*, 43(1):72–78, December 2002. doi: 10.1007/s00254-002-0606-z.
- W. J. Massman. Advective transport of CO<sub>2</sub> in permeable media induced by atmospheric pressure fluctuations: 1. an analytical model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G3), 2006. doi: 10.1029/2006JG000163.
- D. G. Masson. Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 ka ago and the history of landslides in the Canary Islands. *Geology*, 24(3):231–234, March 1996. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0231:CCOTVI>2.3.CO;2.
- Stephen R McNutt. Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories. In *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, pages 99–146. Springer, 1996.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

162 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

163

- Stephen R. McNutt. VOLCANIC SEISMOLOGY. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1):461–491, 2005. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459.
- S. Meletlidis, A. Di Roberto, M. Pompilio, A. Bertagnini, I. Iribarren, A. Felpeto, P. A. Torres, and C. D’Oriano. Xenopumices from the 2011–2012 submarine eruption of El Hierro (Canary Islands, Spain): Constraints on the plumbing system and magma ascent. *Geophysical Research Letters*, 39(17), 2012. doi: 10.1029/2012GL052675.
- Stavros Meletlidis, Alessio Di Roberto, Itahiza Domínguez Cerdeña, Massimo Pompilio, Laura García-Cañada, Antonella Bertagnini, Maria Angeles Benito-Saz, Paola Del Carlo, and Sergio Sainz-Maza Aparicio. New insight into the 2011–2012 unrest and eruption of El Hierro Island (Canary Islands) based on integrated geophysical, geodetical and petrological data. *Annals of Geophysics; Vol 58, No 5 (2015)*, 2015. doi: 10.4401/ag-6754.
- G. Melián, F. Tassi, N. Pérez, P. Hernández, F. Sortino, O. Vaselli, E. Padrón, D. Nolasco, J. Barrancos, G. Padilla, F. Rodríguez, S. Dionis, D. Calvo, K. Notsu, and H. Sumino. A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide Volcano (Tenerife, Canary Islands): a geochemical evidence for the 2004–2005 seismic–volcanic crisis. *Bulletin of Volcanology*, 74(6):1465–1483, August 2012. doi: 10.1007/s00445-012-0613-1.
- Gladys Melián, Pedro A. Hernández, Eleazar Padrón, Nemesio M. Pérez, José Barrancos, Germán Padilla, Samara Dionis, Fátima Rodríguez, David Calvo, and Dacil Nolasco. Spatial and temporal variations of diffuse CO<sub>2</sub> degassing at El Hierro volcanic system: Relation to the 2011–2012 submarine eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9):6976–6991, August 2014. doi: 10.1002/2014JB011013.
- Simone Milanolo and Franci Gabrovšek. Analysis of Carbon Dioxide Variations in the Atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina. *Boundary-Layer Meteorology*, 131(3):479–493, June 2009. doi: 10.1007/s10546-009-9375-5.
- K. Mogi. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 36:99–134, 1958.
- S. Mollo, P. Tuccimei, M. J. Heap, S. Vinciguerra, M. Soligo, M. Castelluccio, P. Scarlato, and D. B. Dingwell. Increase in radon emission due to rock failure:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

163 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

164

BIBLIOGRAFÍA

- An experimental study. *Geophysical Research Letters*, 38(14), July 2011. doi: 10.1029/2011GL047962.
- Manuel Moreira, Jerzy Blusztajn, Joshua Curtice, Stan Hart, Henry Dick, and Mark D. Kurz. He and Ne isotopes in oceanic crust: implications for noble gas recycling in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4):635–643, December 2003. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00554-5.
- W Jason Morgan. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230(5288): 42–43, 1971.
- David Moure García. *Array sísmico inalámbrico y de parámetros ambientales para la caracterización de precursores de actividad volcánica*. PhD thesis, June 2017.
- Sebastian Münn, Thomas R. Walter, and Andreas Klügel. Gravitational spreading controls rift zones and flank instability on El Hierro, Canary Islands. *Geological Magazine*, 143(3):257–268, 2006. doi: 10.1017/S0016756806002019.
- F. A. Nava, V. H. Márquez-Ramírez, F. R. Zúñiga, L. Ávila Barrientos, and C. B. Quinteros. Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, 21(1):127–135, January 2017. doi: 10.1007/s10950-016-9589-1.
- Marco Neri, Elisabetta Ferrara, Salvatore Giammanco, Gilda Currenti, Rosolino Cirrincione, Giuseppe Patané, and Vittorio Zanon. Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Scientific Reports*, 6: 24581, April 2016.
- E.-R. Neumann, E. Wulff-Pedersen, S. L. Simonsen, N. J. Pearson, J. Martí, and J. Mitjavila. Evidence for Fractional Crystallization of Periodically Refilled Magma Chambers in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 40(7): 1089–1123, 07 1999.
- Aurélien Nicolas, Frédéric Girault, Alexandre Schubnel, Éric Pili, François Passelègue, Jérôme Fortin, and Damien Deldicque. Radon emanation from brittle fracturing in granites under upper crustal conditions. *Geophysical Research Letters*, 41(15):5436–5443, July 2014. doi: 10.1002/2014GL061095.
- Erik L. Olson and Richard M. Allen. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 438(7065):212–215, November 2005. doi: 10.1038/nature04214.
- V. M. Oversby, J. Lancelot, and P. W. Gast. Isotopic composition of lead in volcanic rocks from tenerife, canary islands. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 76(14):3402–3413, 1971.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

164 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

165

Germán D. Padilla, Pedro A. Hernández, Eleazar Padrón, José Barrancos, Nemesio M. Pérez, Gladys Melián, Dácil Nolasco, Samara Dionis, Fátima Rodríguez, David Calvo, and Iñigo Hernández. Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011-2012 submarine eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(2):432-447, February 2013. doi: 10.1029/2012GC004375.

Eleazar Padrón, Gladys Melián, Rayco Marrero, Dácil Nolasco, José Barrancos, Germán Padilla, Pedro A. Hernández, and Nemesio M. Pérez. Changes in the Diffuse CO<sub>2</sub> Emission and Relation to Seismic Activity in and around El Hierro, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 165(1):95-114, January 2008. doi: 10.1007/s00024-007-0281-9.

Eleazar Padrón, Nemesio M. Pérez, Pedro A. Hernández, Hirochika Sumino, Gladys Melián, José Barrancos, Dácil Nolasco, and Germán Padilla. Helium emission at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Chemical Geology*, 312-313:138-147, June 2012. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.04.018.

Eleazar Padrón, Germán Padilla, Pedro A. Hernández, Nemesio M. Pérez, David Calvo, Dácil Nolasco, José Barrancos, Gladys V. Melián, Samara Dionis, and Fátima Rodríguez. Soil gas geochemistry in relation to eruptive fissures on Timanfaya volcano, Lanzarote Island (Canary Islands, Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 250:91 - 99, 2013. doi: https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.10.013.

Eleazar Padrón, Nemesio M. Pérez, Fátima Rodríguez, Gladys Melián, Pedro A. Hernández, Hirochika Sumino, Germán Padilla, José Barrancos, Samara Dionis, Kenji Notsu, and David Calvo. Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology*, 77(4):28, March 2015. doi: 10.1007/s00445-015-0914-2.

Antonio Paonita, Antonio Caracausi, Giada Iacono-Marziano, Mauro Martelli, and Andrea Rizzo. Geochemical evidence for mixing between fluids exsolved at different depths in the magmatic system of Mt Etna (Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 84:380-394, 2012. doi: 10.1016/j.gca.2012.01.028.

G Pecoraino, L Brusca, W D'alessandro, S Giammanco, S Inguaggiato, and M Longo. Total CO<sub>2</sub> output from ischia island volcano (italy). *Geochemical Journal*, 39(5):451-458, 2005.

Frédéric Perrier and Jean-Louis Le Mouél. Stationary and transient thermal states of barometric pumping in the access pit of an underground quarry. *Science of the Total Environment*, 550:1044-1056, 2016.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

165 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

166

BIBLIOGRAFÍA

- Frédéric Perrier and Frédéric Girault. Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations. *Geophysical Journal International*, 195(2):945–971, 08 2013. doi: 10.1093/gji/ggt280.
- Frédéric Perrier and Patrick Richon. Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(4):279–296, April 2010. doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.12.003.
- Frédéric Perrier, Pierre Morat, and Jean-Louis Le Mouél. Pressure induced temperature variations in an underground quarry. *Earth and Planetary Science Letters*, 191(1):145 – 156, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00411-3).
- Frédéric Perrier, Patrick Richon, Umesh Gautam, Dilli Ram Tiwari, Prithvi Shrestha, and Soma Nath Sapkota. Seasonal variations of natural ventilation and radon-222 exhalation in a slightly rising dead-end tunnel. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2):220 – 235, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.06.003>.
- Jean-Louis Pinault and Jean-Claude Baubron. Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: A new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8):18101–18120, August 1997. doi: 10.1029/97JB00971.
- F. Pineau and M. Javoy. Carbon isotopes and concentrations in mid-oceanic ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(2):239–257, February 1983. doi: 10.1016/0012-821X(83)90087-0.
- G. Prates, A. García, A. Fernández-Ros, J. M. Marrero, R. Ortiz, and M. Berrocoso. Enhancement of sub-daily positioning solutions for surface deformation surveillance at El Hierro volcano (Canary Islands, Spain). *Bulletin of Volcanology*, 75(6):724, May 2013. doi: 10.1007/s00445-013-0724-3.
- N. M. Pérez.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Isotopic Ratios in Volcanic-Hydrothermal Discharges from the Canary Islands, Spain: Implications on the Origin of the Volcanic Activity. *Mineralogical Magazine*, 58:709–710, 1994. doi: 10.1180/minmag.1994.58A.2.107.
- Nemesio M. Pérez, Pedro A. Hernández, Eleazar Padrón, Gladys Melián, Rayco Marrero, Germán Padilla, José Barrancos, and Dácil Nolasco. Precursory Sub-surface  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  Degassing Signatures of the 2004 Seismic Crisis at

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

166 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

167

- Tenerife, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 164(12):2431–2448, December 2007. doi: 10.1007/s00024-007-0280-x.
- Nemesio M. Pérez, Germán D. Padilla, Eleazar Padrón, Pedro A. Hernández, Gladys V. Melián, José Barrancos, Samara Dionis, Dácil Nolasco, Fátima Rodríguez, David Calvo, and Íñigo Hernández. Precursory diffuse CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S emission signatures of the 2011–2012 El Hierro submarine eruption, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 39(16):n/a–n/a, 2012. doi: 10.1029/2012GL052410.
- A. L. Rizzo, F. Barberi, M. L. Carapezza, A. Di Piazza, L. Francalanci, F. Sor-tino, and W. D'Alessandro. New mafic magma refilling a quiescent volcano: Evidence from He-Ne-Ar isotopes during the 2011–2012 unrest at Santorini, Greece. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(3):798–814, March 2015. doi: 10.1002/2014GC005653.
- AHF Robertson and CJ Stillman. Submarine volcanic and associated sedimentary rocks of the fuerteventura basal complex, canary islands. *Geological Magazine*, 116(3):203–214, 1979.
- Carmen Romero Ruiz. *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*. PhD thesis, Tesis Universidad de La Laguna., La Laguna, 1989.
- Allan M. Rubin. Propagation of Magma-Filled Cracks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1):287–336, May 1995. doi: 10.1146/annurev.ea.23.050195.001443.
- Juan M Bonelli Rubio. *Contribución al estudio de la erupción del volcán del Nambroque o San Juan (Isla de La Palma): 24 de junio-4 de agosto de 1949*. Instituto Geográfico y Catastral, 1950.
- Sergio Sainz-Maza Aparicio. *Caracterización gravimétrica de zonas de rift en islas volcánicas oceánicas: aplicación a las islas de Tenerife y el Hierro*. PhD thesis, 2017.
- Minoru Sakamoto, Yuji Sano, and Hiroshi Wakita. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratio distribution in and around the Hakone volcano. *GEOCHEMICAL JOURNAL*, 26(4):189–195, 1992. doi: 10.2343/geochemj.26.189.
- Yuji Sano, Takanori Kagoshima, Naoto Takahata, Yoshiro Nishio, Emilie Rou-illeau, Daniele L. Pinti, and Tobias P. Fischer. Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Scientific Reports*, 5:13069, August 2015.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

167 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

168

BIBLIOGRAFÍA

- J. C. Santamarta. La minería del agua en el archipiélago canario. *De re metallica (Madrid): revista de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*, (12):1-8, 2009.
- J. C. Santamarta, Luis E. Hernández-Gutiérrez, Jesica Rodríguez-Martín, Rafael J. Lario-Bascones, and Ángel Morales-González-Moro. Radon gas and groundwater: Study of risks in water galleries in Tenerife (Canary Islands, Spain). pages 37-40, 2020.
- J. C. Santamarta et al. Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. 2013.
- J.C. Santamarta. *Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas*. Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España, 2016.
- Rock Santerre. Impact of GPS satellite sky distribution. 1991.
- GmbH SARAD. SARAD RTM2200 especificaciones técnicas, 2020. URL [https://www.sarad.de/product-detail.php?p\\_ID=25&cat\\_ID=1](https://www.sarad.de/product-detail.php?p_ID=25&cat_ID=1).
- K. Saruwatari, J. Kameda, and H. Tanaka. Generation of hydrogen ions and hydrogen gas in quartz-water crushing experiments: an example of chemical processes in active faults. *Physics and Chemistry of Minerals*, 31(3):176-182, April 2004. doi: 10.1007/s00269-004-0382-2.
- Piergiorgio Scarlato, Paola Tuccimei, Silvio Mollo, Michele Soligo, and Mauro Castelluccio. Contrasting radon background levels in volcanic settings: clues from <sup>220</sup>Rn activity concentrations measured during long-term deformation experiments. *Bulletin of Volcanology*, 75(9):751, August 2013. doi: 10.1007/s00445-013-0751-0.
- Ryan Schultz, Virginia Stern, and Yu Jeffrey Gu. An investigation of seismicity clustered near the Cordell Field, west central Alberta, and its relation to a nearby disposal well. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4): 3410-3423, April 2014. doi: 10.1002/2013JB010836.
- N Segovia, MA Armienta, C Valdes, M Mena, JL Seidel, M Monnin, P Pena, MBE Lopez, and AV Reyes. Volcanic monitoring for radon and chemical species in the soil and in spring water samples. *Radiation Measurements*, 36(1-6):379-383, 2003.
- John H Seinfeld and Spyros N Pandis. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2016.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

168 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

168 / 229

BIBLIOGRAFÍA

169

- SenseAir. aSENSE, 2018. URL <https://senseair.com/products/asense/asense-display/>.
- Haraldur Sigurdsson, Bruce Houghton, Steve McNutt, Hazel Rymer, and John Stix. *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier, 2015.
- V. Soler, J. A. Castro-Almazán, R. T. Viñas, A. Eff-Darwich, S. Sánchez-Moral, C. Hillaire-Marcel, I. Farrujia, J. Coello, J. de la Nuez, M. C. Martín, M. L. Quesada, and E. Santana. High CO<sub>2</sub> Levels in Boreholes at El Teide Volcano Complex (Tenerife, Canary Islands): Implications for Volcanic Activity Monitoring. *Pure & Applied Geophysics*, 161(7):1519 – 1532, 2004. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7897-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7897-5_14).
- SPA-15. Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (spa/69/515). 1975.
- Letizia Spampinato, Sonia Calvari, Clive Oppenheimer, and Enzo Boschi. Volcano surveillance using infrared cameras. *Earth-Science Reviews*, 106(1):63–91, May 2011. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.01.003.
- R.S.J. Sparks. Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1):1–15, May 2003. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00124-9.
- Gideon Steinitz, C Martín-Luis, and Oksana Piatibratova. Indications for solar influence on radon signal in the subsurface of Tenerife (Canary Islands, Spain). *The European Physical Journal Special Topics*, 224:687–695, 2015.
- John Stix, Glyn Williams-Jones, and Catherine Hickson. Applying the cospec at active volcanoes. *The COSPEC Cookbook: Making SO<sub>2</sub> Measurements at Active Volcanoes*, edited by: Williams-Jones, G., Stix, J., Hickson, C., IAVCEI, *Methods in Volcanology*, 1:121–167, 2008.
- Colm Sweeney, Timothy Newberger, David R Munro, and others. A multi-decade record of high-quality fCO<sub>2</sub> data in version 3 of the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data*, 8(2), 2016.
- Benoit Taisne, Stephen Tait, and Claude Jaupart. Conditions for the arrest of a vertical propagating dyke. *Bulletin of Volcanology*, 73(2):191–204, March 2011. doi: 10.1007/s00445-010-0440-1.
- G Tamburello, EP Kantzas, AJS McGonigle, A Aiuppa, and G Giudice. Uv camera measurements of fumarole field degassing (La Fossa crater, Vulcano Island). *Journal of volcanology and geothermal research*, 199(1-2):47–52, 2011.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

169 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

170

BIBLIOGRAFÍA

- Yuri A Taran, Alain Bernard, J-C Gavilanes, E Lunezheva, A Cortes, and MA Armenta. Chemistry and mineralogy of high-temperature gas discharges from colima volcano, Mexico. implications for magmatic gas-atmosphere interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1-4):245-264, 2001.
- Dario Tedesco. Systematic variations in the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio and carbon of fumarolic fluids from active volcanic areas in Italy: Evidence for radiogenic  $^4\text{He}$  and crustal carbon addition by the subducting African plate? *Earth and Planetary Science Letters*, 151(3):255-269, October 1997. doi: 10.1016/S0012-821X(97)81852-3.
- Valentin R. Troll and Juan Carlos Carracedo. Chapter 2 - The Geology of El Hierro. In *The Geology of the Canary Islands*, pages 43-99. Elsevier, 2016a. ISBN 978-0-12-809663-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809663-5.00002-5.
- Valentin R. Troll and Juan Carlos Carracedo. Chapter 1 - The Canary Islands: An Introduction. In *The Geology of the Canary Islands*, pages 1-41. Elsevier, 2016b. ISBN 978-0-12-809663-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809663-5.00001-3.
- Valentin R. Troll and Juan Carlos Carracedo. Chapter 3 - The Geology of La Palma. In *The Geology of the Canary Islands*, pages 101-180. Elsevier, 2016c. ISBN 978-0-12-809663-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809663-5.00003-7.
- Valentin R. Troll and Juan Carlos Carracedo. Chapter 7 - The Geology of Lanzarote. In *The Geology of the Canary Islands*, pages 483-530. Elsevier, 2016d. ISBN 978-0-12-809663-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809663-5.00007-4.
- Valentin R. Troll and Juan Carlos Carracedo. chapter 5 - The Geology of Tenerife. In *The Geology of the Canary Islands*, pages 227-355. Elsevier, 2016e. ISBN 978-0-12-809663-5. doi: 10.1016/B978-0-12-809663-5.00005-0.
- Valentin R Troll and Hans-Ulrich Schmincke. Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite 'a', Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 43(2):243-270, 2002.
- P. Tuccimei, S. Mollo, S. Vinciguerra, M. Castelluccio, and M. Soligo. Radon and thoron emission from lithophysae-rich tuff under increasing deformation: An experimental study. *Geophysical Research Letters*, 37(5), March 2010. doi: 10.1029/2009GL042134.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

170 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilár  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

BIBLIOGRAFÍA

171

- Marta Tárraga, Joan Martí, Rafael Abella, Roberto Carniel, and Carmen López. Volcanic tremors: Good indicators of change in plumbing systems during volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 273:33–40, March 2014. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.01.003.
- Roger Urgeles, Miquel Canals, Jesús Baraza, and Belén Alonso. Seismostratigraphy of the western flanks of El Hierro and La Palma (Canary Islands): a record of canary islands volcanism. *Marine Geology*, 146(1-4):225–241, 1998.
- A. Valentin, J. F. Albert-Beltran, and J. L. Diez. Geochemical and geothermal constraints on magma bodies associated with historic activity, Tenerife (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(3):251 – 264, 1990. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90020-G](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90020-G).
- Víctor Villasante-Marcos and Francisco Javier Pavón-Carrasco. Palaeomagnetic constraints on the age of Lomo Negro volcanic eruption (El Hierro, Canary Islands). *Geophysical Journal International*, 199(3):1497–1514, December 2014. doi: 10.1093/gji/ggu346.
- Víctor Villasante-Marcos, Anthony Finizola, Rafael Abella, Stéphanie Barde-Cabusson, María José Blanco, Beatriz Brenes, Víctor Cabrera, Benito Casas, Pablo De Agustín, Fabio Di Gangi, Itahiza Domínguez, Olaya García, Almudena Gomis, Juan Guzmán, Ilazkiñe Iribarren, Guillaume Levieux, Carmen López, Natividad Luengo-Oroz, Isidoro Martín, Manuel Moreno, Stavros Meletlidis, Julie Morin, David Moure, Jorge Pereda, Tullio Ricci, Enrique Romero, Claudia Schütze, Barbara Suski-Ricci, Pedro Torres, and Patricia Trigo. Hydrothermal system of Central Tenerife Volcanic Complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 272:59–77, February 2014. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.12.007.
- Fátima Viveiros, Márcio Marcos, Carlos Faria, João L. Gaspar, Teresa Ferreira, and Catarina Silva. Soil CO<sub>2</sub> degassing path along volcano-tectonic structures in the pico-faial-são jorge islands (azores archipelago, Portugal). *Frontiers in Earth Science*, 5:50, 2017. ISSN 2296-6463. doi: 10.3389/feart.2017.00050. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2017.00050>.
- R. Viñas, A. Eff-Darwich, V. Soler, J.A. Castro-Almazan, M. C. Martín-Luis, J. Coello, M. L. Quesada, and J. de la Nuez. Comparative analysis of continuous radon sensors in underground environments. *Environmental Geology*, 46(8):1108–1117, November 2004. doi: 10.1007/s00254-004-1106-0.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

171 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

172

BIBLIOGRAFÍA

Ronaldo Viñas, Antonio Eff-Darwich, Vicente Soler, María C. Martín-Luis, María L. Quesada, and Julio de la Nuez. Processing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Radiation Measurements*, 42(1):101 – 115, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.002>.

F Waldhauser. *hypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations (hypoDD version 1.0 - 03/2001)*. January 2001.

Randall White and Wendy McCausland. Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 309:139–155, January 2016. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020.

J Tuzo Wilson. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal of Physics*, 41(6):863–870, 1963.

Richard E Zeebe and Dieter Wolf-Gladrow. *CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes*. Number 65. Gulf Professional Publishing, 2001.

Vyacheslav M Zobin. *Introduction to volcanic seismology*, volume 6. Elsevier, 2012.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

172 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Apéndice

173

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

173 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

173 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

174 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Apéndice A

# Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission Inside a Gallery in An Active Volcanic Island (Tenerife, Canary Islands)

*Revista:*  
Pure and Applied Geophysics

*Autores:*  
Pedro Torres González<sup>1</sup>  
David Moure García<sup>1</sup>  
Natividad Luengo-Oroz<sup>1</sup>  
Víctor Villasante-Marcos<sup>2</sup>  
Vicente Soler<sup>3</sup>  
Ilazkiñe Iribarren<sup>1</sup>  
Ana Jiménez-Abizanda<sup>4</sup>  
José García-Fraga<sup>4</sup>

- 1) Centro Geofísico de Canarias, IGN
- 2) Observatorio Geofísico Central, IGN
- 3) Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC
- 4) Departamento Química (UD Química Analítica), ULL

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02174-8>

175

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

175 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

175 / 229



springer.com



## Certificate of Publication

The Editors of journal

hereby confirm that Pedro Torres-González is the Corresponding author of the following article:

Torres-González, P., Moure-García, D., Luengo-Oroz, N. et al. Pure Appl. Geophys. (2019) 176: 3467. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02174-8>

Thank  
you

Part of SPRINGER NATURE

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

176 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Pure Appl. Geophys.  
© 2019 Springer Nature Switzerland AG  
<https://doi.org/10.1007/s00024-019-02174-8>

Pure and Applied Geophysics



## Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission Inside a Gallery in An Active Volcanic Island (Tenerife, Canary Islands)

PEDRO TORRES-GONZÁLEZ,<sup>1</sup> DAVID MOURE-GARCÍA,<sup>1</sup> NATIVIDAD LUENGO-OROZ,<sup>1</sup> VÍCTOR VILLASANTE-MARCOS,<sup>2</sup> VICENTE SOLER,<sup>3</sup> ILAZKINE IRIBARREN,<sup>1</sup> ANA JIMÉNEZ-ABIZANDA,<sup>4</sup> and JOSÉ GARCÍA-FRAGA<sup>4</sup>

**Abstract**—In Tenerife there are a vast number of sub-horizonal blind water mines, called “galleries”. Seven air and soil temperatures and CO<sub>2</sub> concentration profiles in air were carried out inside the Rio de Guía gallery (hereinafter RdG). An anomalous stable maximum temperature point (hereinafter MTP) was found around 2000 m from the entrance. During the warm period, a clear CO<sub>2</sub> stagnation was detected before MTP, showing concentrations up to 14,000 ppm. In order to study gas emission and its dynamics inside the gallery, four stations were deployed around MTP. All stations recorded air and soil temperatures, and CO<sub>2</sub> and Rn concentration in air from November 2009 to January 2011. After analyzing this dataset, it was possible to characterize the influence of MTP. This thermal anomaly divided the gallery into two sections. In the cold period, the outer section located outwards from MTP became colder while the inner section warmed up owing to a less heat transfer into the deepest part of the gallery. There were several short periods when variations in barometric pressure created an advection movement that was able to temporally change the gas behavior inside the gallery. Two soil gas samples were taken around MTP and their  $\delta^{13}\text{C}$  (CO<sub>2</sub>) ratios suggested a magmatic origin. All data were combined to create a model for the gas and thermal dynamics inside the gallery. This model, together with identification of background levels in each parameter, allows to identify any anomalous signal that could be elated with changes in volcanic activity.

**Key words:** Thermal anomaly, gallery, Tenerife, radon, CO<sub>2</sub> and temperature profiles, volcano monitoring.

### 1. Introduction

Quantification and characterization of gaseous emissions in active volcanic areas is an important tool to describe volcanic activity (Albert-Beltrán et al. 1990; Hernández et al. 2000; Notsu et al. 2005; Aiuppa et al. 2010; Arpa et al. 2013). An appropriate geochemical monitoring program could identify variations in the gaseous emissions related to changes in volcanic activity, unrest signals and/or precursory eruption trends (Cigolini et al. 2007; Melián et al. 2012; López et al. 2012; Falsaperla et al. 2014; Laiolo et al. 2016).

Study of CO<sub>2</sub> degassing processes is widely used as a volcanic monitoring tool (Chiodini et al. 1998, 2001; Notsu et al. 2005; Liuzzo et al. 2013). Carbon dioxide is the most abundant gas after water vapor in the magmatic volatile phase in the magma. Its low solubility in silicate melts makes it one of the first gases to be released from ascending magmas. It uses any preferential path to reach the surface such as porous media, fractures and/or cracks (Albert-Beltrán et al. 1990; Chiodini et al. 1996, 1998, 2001; Melián et al. 2012). Diffusion, convection and/or advection are the main transport mechanisms (Liuzzo et al. 2013; Notsu et al. 2005; Padrón et al. 2015).

A useful tracer to study gaseous emissions in volcanic areas is radon, <sup>222</sup>Rn. It is a naturally radioactive noble gas with a half-life of 3.82 days. It originates in the disintegration chain of <sup>238</sup>U with <sup>226</sup>Ra as parent isotope. Radon has been linked with magmatic (Cox et al. 1980; Cigolini et al. 2005; Alparone et al. 2005; Pérez et al. 2007; Falsaperla et al. 2014) and seismic activity (Richon et al. 2003; Alparone et al. 2005; Cigolini et al. 2007; Delfa et al.

<sup>1</sup> Instituto Geográfico Nacional, Centro Geofísico de Canarias, C/La Marina 20, 2, 38001 Santa Cruz de Tenerife, Spain. E-mail: patorres@fomento.es

<sup>2</sup> Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico Central, C/Alfonso XII 3, 28014 Madrid, Spain.

<sup>3</sup> Instituto de Productos Naturales y Agrobiología CSIC, Estación Volcanológica de Canarias, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez 3, 38203 San Cristóbal de La Laguna, Spain.

<sup>4</sup> Departamento Química (UD Química Analítica), Universidad de La Laguna, Facultad de Ciencias, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, 38200 San Cristóbal de La Laguna, Spain.

Published online: 27 March 2019

Birkhäuser

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

177 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

P. Torres-González et al.

Pure Appl. Geophys.

2008; Giammanco et al. 2009). However, due to its short half-life when diffusion is its main transport mechanism, only the gas produced near the measuring place is detected (Martin-Luis et al. 2015; Laiolo et al. 2016). When the main transport mechanism is convection/advection deep origin signals can be recorded (Pérez et al. 2007; Cigolini et al. 2007).

In active volcanic areas, changes in CO<sub>2</sub> and/or radon concentrations can be caused by magma intrusion and changes in rock stress, among other factors (Chiodini et al. 1998; Alparone et al. 2005; Massman 2006; Arpa et al. 2013; Martín-Luis et al. 2015; Neri et al. 2016).

Whenever a gas emission is measured in soils or near the surface, influence of meteorological parameters is strong (Milanolo and Gabrovšek 2009; Liuzzo et al. 2013; Martín-Luis et al. 2015; Laiolo et al. 2016). Barometric pressure, ambient temperature, rainfall and wind speed are the most important parameters affecting gaseous emissions. Before using this type of measurements in volcano monitoring, it is of fundamental importance to perform a careful study in order to detect and account for any interfering non-volcanic signal.

A good strategy is to place the equipment in a location where the influence of meteorological parameters is minimized. In the Canary Islands there are many groundwater mining infrastructures called galleries which fulfill this condition (Martín-Luis et al. 2002). These galleries are sub-horizontal blind tunnels with a 2 m × 2 m section and lengths ranging from a 100 meters to kilometers. Several authors have tested them as locations to monitor volcanic activity, proving their suitability for this task (Eff-Darwich et al. 2002; Viñas et al. 2007; Pérez et al. 2007).

On Tenerife, galleries are the main groundwater exploitation system, numbering around 1200 (CIATF 2018). They are located from a few meters above sea level up to almost 2000 m in elevation. In the central edifice of the island, galleries show a radial spatial distribution (Fig. 1b). This configuration and the large number of them facilitates finding the best place to monitor gaseous emissions in the island.

In this work, air and soil temperatures were studied, alongside carbon dioxide and radon emissions in a gallery located in the western part of

Tenerife island. Our analysis was performed from both spatial and temporal points of view. The spatial analysis was performed by measuring both temperatures and CO<sub>2</sub> concentration in air in a profile along the gallery. Seven profiles were carried out. In turn, temporal analysis was done by deploying four continuous measurement stations inside the gallery. A detailed description of the gas dynamics inside the gallery and the identification of background levels of all parameters were obtained. Thus, we have been able to define a baseline level and a model for gallery dynamics during a quiescent volcanic period, which are two fundamental prerequisites for any successful use of gallery measurements as a volcano monitoring tool.

## 2. Geological Context

Tenerife is the largest island in the Canary Archipelago with a total area of 2034 km<sup>2</sup> and located 280 km from the northwestern African coast (Fig. 1a). It is an active volcanic island with a complex geological history (Troll and Carracedo 2016). The subaerial part of the island was initially constructed by fissure eruptions between 12 Ma and 3.3 Ma. At least three shield volcanoes were built as a result of these processes, remains of which are still present in the three corners of the island as eroded massifs: Teno (NW), Anaga (NE) and Roque del Conde (S). About 3.5 Ma ago, new volcanic activity started in the center of the island. In that area, emission of basalts and more evolved volcanic products, like phonolites and trachytes, gave rise to a large volcanic complex, the Las Cañadas edifice (Troll and Carracedo 2016). After initial stages of mafic volcanism, several periods of phonolitic activity took place. In addition, there were destructive processes like vertical (Martí and Gudmundsson 2000) and gravitational collapses (Carracedo 1994).

This activity culminated in the origin of a large elliptical depression (16 × 9 km) known as Las Cañadas caldera (Carracedo 1994; Martí and Gudmundsson 2000). During the last 175 ka, at the northern side of Las Cañadas caldera, the Teide-Pico Viejo complex has been growing (Carracedo et al. 2007) (Fig. 1), representing the most recent phase of

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

178 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

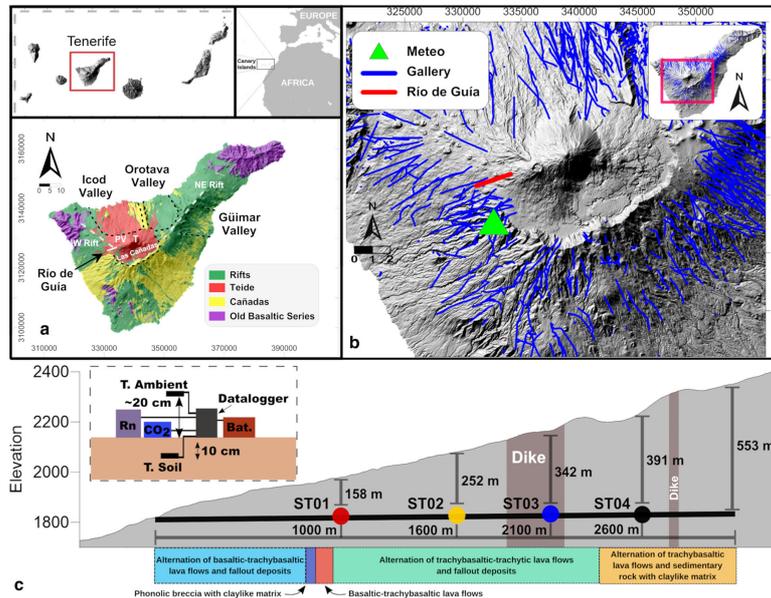


Figure 1  
 a Location and geological maps of Tenerife showing main structures: Las Cañadas caldera and Teide-Pico Viejo (T and PV) volcanic complex. b Galleries locations (blue lines), RdG gallery (red line) and Chavao meteorological station (green triangle). c Vertical cross section of RdG gallery depicting the locations of the four stations, the dikes identified by Tenerife Water Council and brief geological description based on (Farrujia 1989). Standard station configuration is schematized in upper left corner of c)

central volcanism with well differentiated volcanic products. The last eruption inside Las Cañadas caldera was Chahorra (1798) (Romero Ruiz 1989), which took place on the south-west flank of Pico Viejo stratovolcano, close to RdG gallery (Fig. 1). Later basaltic activity is mainly located on the two radial rifts, NE and NW, as well as on the southern slope of the island (Carracedo et al. 2011; Troll and Carracedo 2016). The last three historical eruptions took place on the NW rift (Romero Ruiz 1989). Together with the Teide-Pico Viejo complex, this rift

has been the most active volcanic area on the island during the last 50 ka (Troll and Carracedo 2016).

In 2004 and 2005 there was an anomalous seismic activity located at the western part of the island. Five earthquakes were felt by the population and about 1000 seismic events were located up to 15 km depth (Cerdeña et al. 2011). During May 2004 there was a tremor signal reported inside Las Cañadas caldera (Almendros et al. 2007). No ground deformation was registered, but other geochemical (Melián et al. 2012) and geophysical (Prutkin et al. 2014) anomalies were found.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

P. Torres-González et al.

Pure Appl. Geophys.

### 3. Experimental Set-Up

The Río de Guía gallery is 3150 m in length and approximately 2% slope, and never drained water. It runs in an approximately W–E direction and is located on the western side of the island (1820 m.a.s.l.). This gallery was selected due to its strategic location, intersecting the junction point between the NW rift and Pico Viejo stratovolcano (Fig. 1b).

#### 3.1. Profiles

Seven profiles of temperatures in air and soil, and CO<sub>2</sub> concentration in air were recorded by collecting data every 200 m along the gallery (Table 1). Soil temperature was measured by burying a PT100 ( $\pm 0.1$  °C) probe 10 cm deep, while another PT100 probe ( $\pm 0.1$  °C) was placed 10 cm above the ground to record air temperature. To measure CO<sub>2</sub> concentration in air, an NDIR sensor from SenseAir with 3% vol. CO<sub>2</sub> measuring range, accuracy of  $\pm 30$  ppm  $\pm 3\%$  reading, (SenseAir 2018) was placed on the ground. Once all devices were deployed, the personnel moved back several meters and waited 5 min to ensure stable measurement.

#### 3.2. Soil Gas Samples

Two soil gas samples were taken on July 2018 at 2050 (A) and 1600 (B) m from the entrance to the gallery. A silicone tube was inserted up to 40 cm

deep and then, by using a syringe, the gas sample was sucked and stored in glass vials. Their analysis was accomplished in the laboratories of Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) at Palermo, Italy. Gas samples for carbon isotope analysis were introduced into vacuum lines for standard purification procedures. After removing sulfur species by using lead acetate filters, CO<sub>2</sub> was cryogenically purified and admitted to a Finnigan Delta Plus dual inlet mass spectrometer for carbon isotope determinations. It was calibrated using a CO<sub>2</sub> working standard, prepared by quantitative reaction of a certified Carrara marble sample ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{MAB}} = + 2.45\%$  vs. PDB) with pure H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Isotopic compositions of CO<sub>2</sub> are given in  $\delta^{13}\text{C}$  (CO<sub>2</sub>) vs. VPDB, with standard deviation lower than 0.2%.

#### 3.3. Continuous Stations

In order to study gaseous emission properly, four continuous measuring stations were deployed from November 2009 to January 2011 at 1000 (ST01), 1600 (ST02), 2100 (ST03) and 2600 (ST04) m from the entrance, surrounding MTP (Fig. 1c). Each station recorded air and soil temperatures, CO<sub>2</sub> and Rn concentrations in air every 30 min. All stations used the same sensors and stored data locally.

Both temperatures were measured using PT100 probes ( $\pm 0.05$  °C). Soil thermometers were buried 10 cm deep, while air temperature probes were placed 20 cm above the ground. Carbon dioxide concentrations in air were determined with the same

Table 1

Descriptive statistics of the seven profiles carried out inside RdG gallery

ID	Date (yyymmdd)	T <sub>a</sub> $\pm 0.1$ (°C)				T <sub>s</sub> $\pm 0.1$ (°C)				[CO <sub>2</sub> ] (ppm)			
		Min	Mean	Max	SD	Min	Mean	Max	SD	Min	Mean	Max	SD
P1	090513	6.8	8.2	10.4	1.2	–	–	–	–	500 $\pm$ 45	600 $\pm$ 48	1100 $\pm$ 63	200
P2	090805	7.2	8.7	10.4	1.0	–	–	–	–	1200 $\pm$ 66	4400 $\pm$ 162	13800 $\pm$ 444	3800
P3	091223	7.2	8.5	10.5	1.0	7.0	8.5	10.4	1.0	900 $\pm$ 57	1400 $\pm$ 72	1900 $\pm$ 487	300
P4	100630	7.2	8.7	10.5	1.0	7.0	8.7	10.5	1.0	1100 $\pm$ 63	3900 $\pm$ 147	9800 $\pm$ 324	3000
P5	101019	7.3	8.7	10.5	1.0	7.0	8.7	10.4	1.0	800 $\pm$ 54	2300 $\pm$ 99	5400 $\pm$ 192	1400
P6	110113	6.8	8.5	10.5	1.1	5.2	8.2	10.4	1.3	400 $\pm$ 42	600 $\pm$ 48	800 $\pm$ 54	200
P7	180605	7.6	8.7	10.6	0.9	7.5	8.9	10.4	0.9	500 $\pm$ 45	1000 $\pm$ 60	1800 $\pm$ 84	400
Average profiles		7.2	8.5	10.5	1.0	7.0	8.5	10.4	1.0	800 $\pm$ 54	2200 $\pm$ 96	4900 $\pm$ 177	1300

T<sub>a</sub> and T<sub>s</sub> stand for air and soil temperature, respectively, and [CO<sub>2</sub>] is carbon dioxide concentration in air

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

180 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

sensors used for the profiles. Radon concentration in air was recorded using radon monitors from Aware Electronics based on a Geiger tube, RM-70 model (Aware Electronics Corp. RM specs. 2018),  $\pm 4$  counts per minute (cpm). All gas sensors were placed on the ground.

4. Results

The datasets from profiles and continuous measuring stations are analyzed in the following sections.

4.1. Profiles (Spatial Distribution)

Six profiles along the gallery were taken between May 2009 and January 2011, at least one in each season, and an additional profile in June 2018. In all of them air temperature ( $T_a$ ) and  $\text{CO}_2$  concentration in air were recorded. In the last five profiles, soil temperature ( $T_s$ ) was measured as well. In Fig. 2, profiles for each parameter are shown, as well as their average profile. In Table 1, descriptive statistics are shown for every profile and every average parameter profile.

The main characteristic of both temperatures was the maximum value around 2000 m deep, MTP (Fig. 2a, b). Both temperature profiles showed similar pattern, with a relative maximum temperature value (MTP), to those reported by Atkinson et al. (1983) in Castleguard cave at Alberta, Canada. The MTP showed a stable location and constant value along all seven profiles. The maximum values measured were  $10.6 \pm 0.1$  °C and  $10.5 \pm 0.1$  °C for air and soil temperatures, respectively (Table 1). Both are the same within the measurement's precision. Minimum recorded values were  $6.8 \pm 0.1$  °C and  $5.2 \pm 0.1$  °C for air and soil temperatures, respectively (Table 1). Average temperatures in each profile were very similar. Based on both soil and air average temperature profiles, the average temperature of the gallery was defined as 8.5 °C (hereinafter  $T_m$ ). This finding was expected since all profiles had similar distribution values. Low standard deviations of around 1 °C in air and soil temperatures, confirm both stabilities.

Variability was greater for  $\text{CO}_2$  concentration in air (Fig. 2c). There are some 'flat profiles' where  $\text{CO}_2$  concentration remained almost constant along the gallery, and very close to the atmospheric value. On the other hand, some profiles show wide variations in

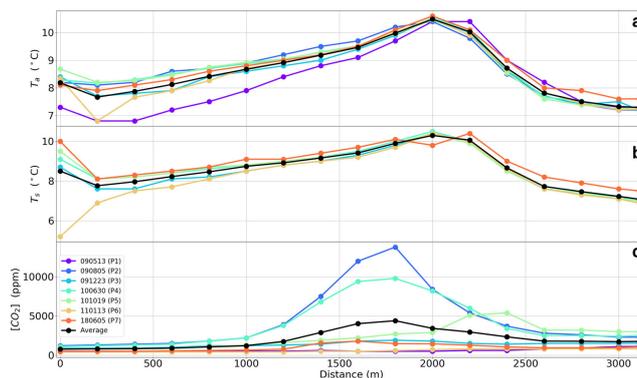


Figure 2  
 a Air temperature, b soil temperature and c carbon dioxide concentration in air profiles inside the gallery. Profiles are sorted by date (yymmdd) and the average parameter profile (black line) is also shown

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

CO<sub>2</sub> concentration in air along the gallery. Lower CO<sub>2</sub> concentrations were typical of cold periods in the gallery: P1, P3 and P6 (Fig. 2c and Table 1) (cold and warm periods will be defined in Sect. 4.3.1). In contrast, higher CO<sub>2</sub> concentrations in air were reached during the warm: P2, P4 and P5 (Fig. 2c and Table 1). The maximum recorded value of carbon dioxide concentration was 13,800 ± 444 ppm (P2, Table 1). It is also important to highlight that the maximum CO<sub>2</sub> concentration in air was reached 200 m outward from MTP (Fig. 2c).

Figure 3 shows the three average profiles georeferenced over a shaded relief map of central Tenerife. Maximum values in the three profiles are located to the south of a cinder cone, Montaña Cruz de Tea (MCT), and in the westward end of the fissure vent Montaña Chio (MC) (Carracedo et al. 2007). Stratigraphy suggests that the MCT eruption occurred during the Holocene (Carracedo et al. 2007). In contrast, MC eruption has been dated by Carracedo et al. (2007) at 3933 ± 212 CAL year. B.P. Several

dikes between 2000 and 2200 m from the entrance of the gallery, coinciding with MTP location, were identified by Tenerife Water Council (Farrujia 1989). Its direction, N80 W, matches the main fractures orientations and cinder cones alignments in the NW rift (Carracedo et al. 2007).

#### 4.2. $\delta^{13}C(CO_2)$ In Soil Gas

Two soil gas samples were taken at two points along the gallery (Sect. 3.2). Results of the analysis are shown in Table 2. Oxygen and nitrogen concentrations are very close to their atmospheric standard values (Seinfeld and Pandis 2012), indicating good mixing between the inside and outside air even at that depth. Methane concentration values similar to free air (Seinfeld and Pandis 2012) showed no biogenic or hydrothermal contribution to these samples. Despite low CO<sub>2</sub> concentrations at both sampling points, 2700 ppm at point A and 2100 ppm at point B, the  $\delta^{13}C(CO_2)$  values, - 6.7‰ and - 6‰ for A and B,

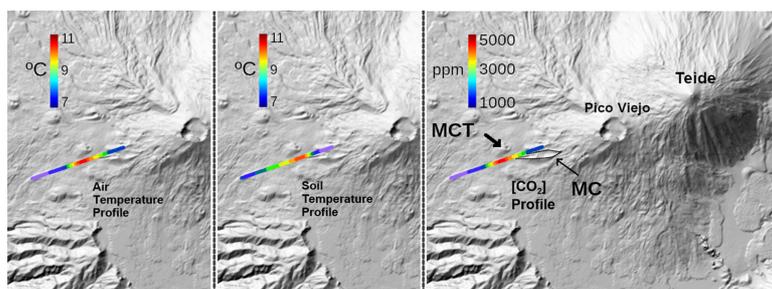


Figure 3

Georeferenced average profiles. From left to right: air temperature, soil temperature and carbon dioxide concentration in air inside the gallery

Table 2

Soil gas analysis, including  $\delta^{13}C(CO_2)$  isotopic ratio

ID	Deep (m)	[He]	[H <sub>2</sub> ]	[O <sub>2</sub> ]	[N <sub>2</sub> ]	[CO]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]	[H <sub>2</sub> S]	$\delta^{13}C$ (CO <sub>2</sub> )
A	2050	< 5	< 5	203,900	776,700	3.4	1.1	2700	< 5	- 6.7
B	1600	< 5	< 5	205,300	773,600	2.9	0.8	2100	< 5	- 6

Concentrations are expressed in ppm

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

182 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

respectively, correspond to the typical MORB range, – 4 to – 9 ‰ (Pineau and Javoy 1983).

4.3. Continuous Stations (Temporal Evolution)

Four stations were deployed along the gallery (Fig. 1c) to study the influence of MTP on its gaseous and temperature dynamics. The dataset from these stations is analyzed in the following sections.

4.3.1 Long Period

The whole dataset from continuous measuring stations is shown in Fig. 4. In order to reduce transient signals as well as barometric pressure influence, a 24-h moving average was applied. Difference between external temperature,  $T_e$  (recorded at Chavao meteorological station, 3.6 km away from the gallery, Fig. 1b), and  $T_m$ , along with atmospheric pressure readings are also plotted (Fig. 4a). Based on this temperature difference, two main seasons can be defined in the gallery. The cold period, when  $T_e$  showed values lower than  $T_m$  ( $T_e - T_m < 0$ ,

Fig. 4a). It covers dates between the beginning of the dataset to the end of May 2010, and from mid November 2010 until the end of January 2011. The warm period when  $T_e$  is clearly higher than  $T_m$  ( $T_e - T_m > 0$ , Fig. 4a), from the beginning of June to mid-November. Profiles performed while the stations were deployed (P3, P4, P5 and P6 in Table 1) have been plotted from panel b to e in Fig. 4 as vertical dashed lines.

4.3.2 Air and Soil Temperatures

Both temperatures were very stable at all stations during the whole measured period, as their statistics descriptors confirm (Table 3). The deeper into the gallery the station was located, the less the influence of external meteorological parameters is, as expected (Perrier and Richon 2010). Due to this, ST01 showed the highest difference between maximum and minimum temperature values ( $1.0 \pm 0.1$  °C). Maximum air and soil temperatures were recorded at stations ST02 and ST03, which were the closest to MTP (Table 3). In contrast, both minima were at ST04, the

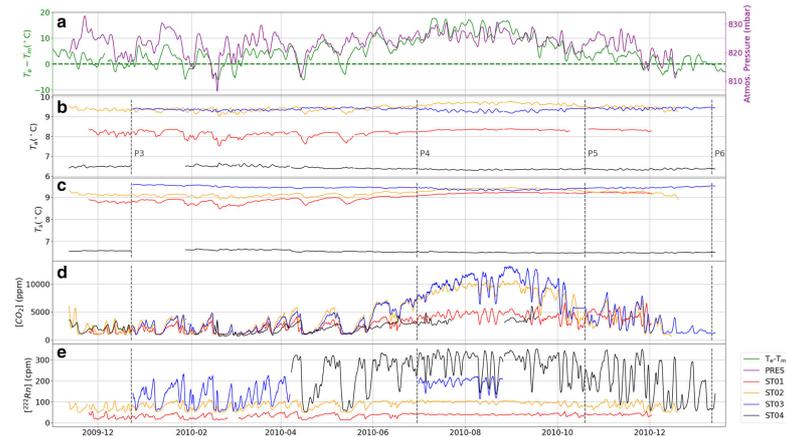


Figure 4  
 24-h moving average of every parameter at every station. a Atmospheric pressure (purple) along with difference between  $T_e$  and  $T_m$  (green). b Time evolution of air temperatures at every station. c Soil temperatures at every station. d Carbon dioxide and e radon concentrations in air

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

P. Torres-González et al.

Pure Appl. Geophys.

Table 3

Descriptive statistics for each parameter recorded at the four stations

Station	Parameter	Measurements	Min	Mean	Max	SD
ST01	T <sub>a</sub> ± 0.05 (°C)	17,062	7.48	8.21	8.48	0.16
	T <sub>s</sub> ± 0.05 (°C)	17,536	8.46	8.98	9.26	0.19
	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	17,549	946 ± 58	2965 ± 119	8649 ± 290	1597
ST02	[ <sup>222</sup> Rn] ± 4 (cpm)	17,479	9	35	91	10
	T <sub>a</sub> ± 0.05 (°C)	19,364	8.98	9.45	9.92	0.16
	T <sub>s</sub> ± 0.05 (°C)	19,369	8.78	9.18	9.44	0.13
	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	19,163	451 ± 44	4470 ± 164	12931 ± 418	3161
ST03	[ <sup>222</sup> Rn] ± 4 (cpm)	19,369	44	84	151	20
	Pressure	19,336	804.3	823.3	834.3	3.96
	T <sub>a</sub> ± 0.05 (°C)	18,163	9.11	9.37	9.55	0.08
	T <sub>s</sub> ± 0.05 (°C)	18,163	9.27	9.43	9.60	0.07
	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	18,167	849 ± 56	4869 ± 176	15349 ± 491	3717
ST04	[ <sup>222</sup> Rn] ± 4 (cpm)	7755	50	151	270	58
	T <sub>a</sub> ± 0.05 (°C)	18,853	6.28	6.40	6.69	0.08
	T <sub>s</sub> ± 0.05 (°C)	18,863	6.46	6.54	6.67	0.05
	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	11,351	656 ± 50	2309 ± 99	8000 ± 270	1004
	[ <sup>222</sup> Rn] ± 4 (cpm)	13,496	49	237	374	94

T<sub>a</sub> and T<sub>s</sub> stand for air and soil temperature, respectively and, [CO<sub>2</sub>] and [<sup>222</sup>Rn] are carbon dioxide and radon concentrations in air, respectively

deepest station, with  $6.46 \pm 0.05$  °C and  $6.28 \pm 0.05$  °C in air and soil, respectively.

A clear seasonal component was present (Martín-Luis et al. 2015). In addition, there was a clear difference between stations located outward and inward from MTP. Those located outward (ST01 and ST02) showed their lowest temperatures during cold periods and highest in the warm period, following the external temperature trend (Fig. 4a). In contrast, those stations deployed inward from MTP (ST03 and ST04) followed the opposite trend (Fig. 4b, c). This behavior was noted in both temperatures, but was more evident in air than soil.

#### 4.3.3 Carbon Dioxide

The CO<sub>2</sub> concentration in air showed its highest values at ST03 during the warm period,  $15,349 \pm 491$  ppm (Table 3). ST02 and ST03 showed the highest standard deviations and average values for this parameter. Usually, lower values were measured at ST04, in both cold and warm periods. Seasonal dependence was more evident than it was for temperatures. During the warm period, there was a clear stagnation in all stations, most pronounced at ST02 and ST03 (Fig. 4d), the closest to MTP.

#### 4.3.4 Radon

An increase in statistical descriptors along the gallery from ST01 to ST04 is evident (Table 3). Not only does the average value increase inwards, but also the standard deviation as well. Therefore, greater variations were present at deeper stations (Fig. 4e) (Barbosa et al. 2007). ST01 showed minimum values while the highest were present at ST04 (Table 3). Radon concentration showed similar background values during the cold period at ST02, ST03 and ST04 (around  $50 \pm 4$  cpm), significantly higher than at ST01 ( $15 \pm 4$  cpm). Radon also showed a seasonal dependence. During the warm period, there was a clear accumulation at all stations as with carbon dioxide. Based on the stations dataset, radon reached its maximum value at ST04, in contrast to CO<sub>2</sub> (Fig. 4d). Moreover, radon reached its maximum concentration level earlier than CO<sub>2</sub> at all stations (Fig. 4d, e). Determining when each gas at each station exceeded its average saturation value minus one standard deviation (calculated both from the warm period) lag times between CO<sub>2</sub> and radon were estimated, 8 and 10 days for ST01 and ST04, respectively and 38 days for ST02 and ST03.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

184 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

4.3.5 Short Period

The dataset is studied in more detail selecting two time windows, from the cold and warm periods.

4.4. Cold Period

February 2010 was selected to show the main characteristics during cold periods (Fig. 5). For a better comprehension, both temperatures were subtracted by their average values at each station (Fig. 5b, c).

When  $T_e > T_m$  (Fig. 5a), from February 5th to 14th and from 23rd to 28th, there was an increase in carbon dioxide and radon concentrations at all stations (Fig. 5d, e). A small accumulation process occurred. In contrast, temperatures exhibited different trends if a station is located outwards (close to the entrance) or inwards from MTP. Stations ST01 and ST02 underwent a small increase while temperatures decreased at ST03 and ST04 (Fig. 5b, c).

When temperature difference is negative ( $T_e < T_m$ ), from February 14th to 24th, there was a clear

drop in both gas concentrations, reaching their background levels. The two temperatures again showed different tendencies. A decrease at ST01 and ST02 and a slight increase at ST03 and ST04 were detected.

From February 14th to 24th, both gas concentrations appear to be governed by atmospheric pressure. This is clear from February 17th to 20th. When atmospheric pressure dropped, gas concentrations rose, first at deeper stations. When pressure increased, gas concentrations decreases, firstly at stations closer to the entrance. On the same dates, both temperatures at all stations showed atmospheric pressure dependence. When the barometric pressure decreased, temperatures at ST01 and ST02 raised, whereas at ST03 and ST04 they dropped slightly. In contrast, when atmospheric pressure increased the opposite was registered.

4.5. Warm Period

In this season,  $T_e$  remained always higher than  $T_m$  (Fig. 6a). Stability was evident in both temperatures

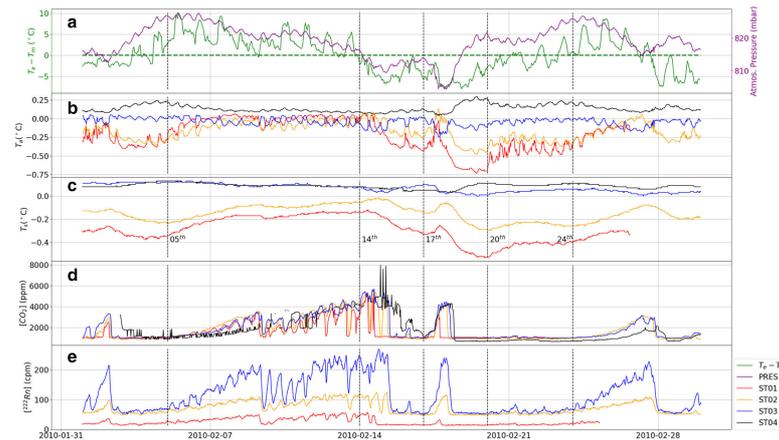


Figure 5  
 Cold period, February 2010. Time evolution of: a atmospheric pressure (purple) together with the difference between  $T_e$  and  $T_m$  (green), b air temperatures (mean value subtracted), c soil temperatures (mean value subtracted), d carbon dioxide and e radon concentrations in air

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

P. Torres-González et al.

Pure Appl. Geophys.

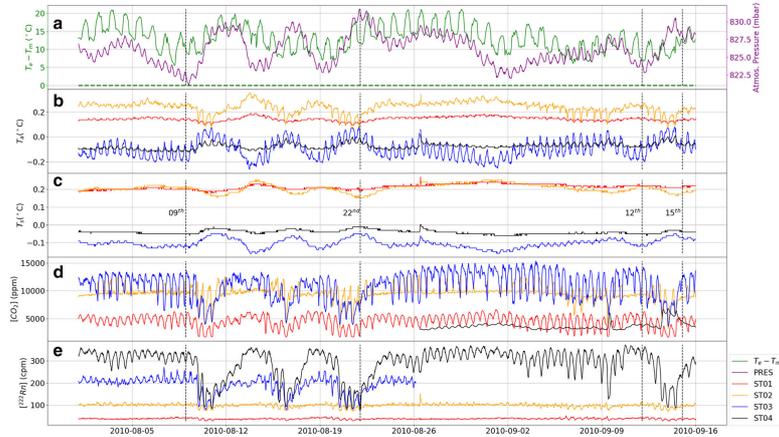


Figure 6

Part of warm period from August 1 2010 to September 15 2010. Time evolution of: a atmospheric pressure (purple) together with the difference between  $T_e$  and  $T_m$  (green), b air temperatures (mean value subtracted), c soil temperatures (mean value subtracted), d carbon dioxide and e radon concentrations in air

and also the accumulation process of both gases at all stations. Figure 6 shows the time window between August 1, 2010 and September 15, 2010.

Carbon dioxide concentration in air showed two well-differentiated levels. The lower was recorded at both ST01 and ST04, and the higher at ST02 and ST03. Hence, maximum  $CO_2$  values were found around ST02 and ST03, as seen in the profiles (P2 and P4 in Fig. 2c). These latter two stations alternated with the maximum  $CO_2$  values shifting between them even during a single day (Fig. 6d). In contrast, radon concentration showed a clear stratification. The deeper into the gallery the station was located, the higher was the radon concentration value, suggesting that the source of radon was not specifically linked with MTP (Martin-Luis et al. 2015).

Since  $T_e > T_m$  remained positive during this time period, external influence could only be expected from atmospheric pressure. Despite the stability of both temperatures, there was a slight atmospheric pressure influence. Stations ST01 and ST02,

outwards from MTP, showed a slight drop in temperature when the pressure rose, while temperature increased at ST03 and ST04. When the pressure dropped, this process was reversed (from August 9th to 22nd).

When the barometric pressure rose, a clear  $CO_2$  decrease was detected at ST01, ST02 and ST03, from August 9th to 22nd and from September 12th to 15th, followed by an increase at ST04 a few days later, from September 13th to 15th (Fig. 6d). In contrast, with the same pressure trend, there was an abrupt drop in radon concentration at ST03 and ST04, reaching similar values to ST02 (Fig. 6e). At the same time, ST01 and ST02 showed a slight radon decrease. When atmospheric pressure became stable again, carbon dioxide and radon concentrations returned to earlier values. When barometric pressure decreased it seems not to have had any influence on either gas concentration.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

186 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

4.6. Spectrum Analysis

From Fig. 7c–f, the spectrum amplitude of each parameter during cold and warm periods is shown for each station. Spectrum amplitudes of external parameters, barometric pressure and  $T_e$ , in Fig. 7a, b.

4.7. Cold Period

Inner parameters show a marked 12-h periodicity (semidiurnal period, S2), which matches with the most energetic frequency component in the atmospheric pressure spectrum (Fig. 7b1).

The highest semidiurnal periods in both soil and air temperatures, are present at ST02 and ST03, the closest to MTP (Fig. 7c1, e1). The  $CO_2$  spectrum shows a decrease in the S2 component along the gallery. ST04 does not show a clear semidiurnal period. In contrast, radon concentration behaves very differently. The spectrum at the innermost station shows a higher and clearer S2 period.

There is no strong influence regarding the highest frequency component in the  $T_e$  spectrum (Fig. 7a1), 24-h periodicity (diurnal period, S1). Low periods

such as 8, 6, 4.8 and 4 h are also present, except in soil temperature, as expected.

4.8. Warm Period

The S2 component is still the most important in all parameters at all stations. There is a general decrease in semidiurnal period amplitude in both of the temperatures, except at ST02. This station and ST03 show the highest S2 amplitudes of both temperatures.

The  $CO_2$  spectrum shows an increase in S2 at all stations with respect to the cold period. Atmospheric pressure influences  $CO_2$  more than in the cold period. The predominant diurnal period in  $T_e$  spectrum, S1, is clearly present in all parameters with higher values than in the cold period. But it is still lower than S2. Frequency components 8, 6 and even 4.8 h are still present, but now more clearly defined than in the cold period.

In radon concentration spectrums, the semidiurnal period amplitude shows a lower value than in cold periods, as well as two new peaks flanking it. These new frequency components are located at 11 and

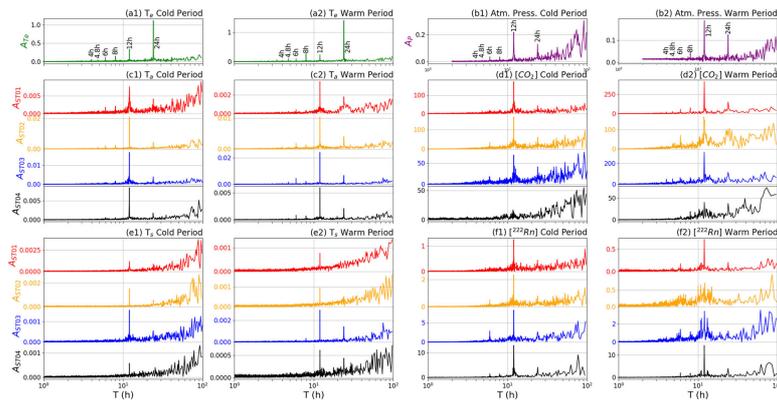


Figure 7  
 Power spectrum amplitude during cold and warm periods. External parameters are shown in a and b. From c to f, parameters measured at every station are plotted. Scales are different in order to ease the interpretation

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilera  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

13.1 h, respectively, and they are clearer at ST03 and ST04 stations.

Due to the short dataset time length and some gaps in the data, there was not enough resolution to distinguish frequencies related to earth tides in the radon spectrum (Steinitz et al. 2015).

#### 4.9. Cross-Correlations

In order to quantify the influence of external parameters, Pearson correlation coefficients ( $p < 0.05$ ) were calculated correlating atmospheric pressure and  $T_e - T_m$  with each parameter recorded inside the gallery for the whole dataset (Table 4). Butterworth low-pass filter with a 3 day cut-off period was applied to smooth transient signals.

Both temperatures showed a positive correlation at ST01 and ST02 to  $T_e$ , whereas for ST03 and ST04 it was negative. Hence, when  $T_e$  increased, both temperatures rose outward from MTP (ST01 and ST02) and decreased inwards (ST03 and ST04). When  $T_e$  decreased, this process was inverted. Both gases displayed a positive correlation value with the temperature difference, pointing to an accumulation process when external temperature exceeds  $T_m$ .

Regarding the influence of atmospheric pressure, Pearson coefficients for both gases were lower than for  $T_e - T_m$ , probably due to periods with active natural ventilation, when there were no clear variations in gas concentrations. Carbon dioxide and radon showed negative correlations with atmospheric pressure, as expected (Perrier et al. 2001; Martín-Luis et al. 2015). Soil and air temperatures behaved differently. Those stations located outwards from MTP show a negative correlation coefficient with

barometric pressure. In contrast, the innermost two stations (ST03 and ST04) have a positive correlation.

#### 4.10. Ventilation and Accumulation

##### 4.10.1 Ventilation Regime

A complete description of the complex fluid mechanics inside the gallery is outside of the scope of this work. Instead, a simplified description can be accomplished by estimating the ventilation rate. From Perrier et al. 2003:

$$\lambda_v = \lambda \left( \frac{A_{warm}}{A_{cold}} - 1 \right), \quad (1)$$

$A_{warm}$  and  $A_{cold}$  stand for radon concentrations in warm and cold periods, respectively,  $\lambda$  is the  $^{222}\text{Rn}$  decay constant ( $7.56 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) and  $\lambda_v$  is the cold period ventilation rate.

Although the radon monitors used do not yield a concentration calibrated in  $\text{Bq/m}^3$ , Eq. (1) can still be used to estimate the ventilation rate in the cold period, during which natural ventilation is predominant. Average ventilation rates with respect to the decay constant (normalized ventilation rate,  $\lambda_v/\lambda$ , (Perrier et al. 2007)) are shown in Table 5. There is a clear difference between stations located outward from MTP (ST01 and ST02) and those deployed inward (ST03 and ST04). The latter pair of stations show average normalized ventilation rates around 0.6, which are double the former pair, close to 0.3. Obviously, this fact determines the residence time,  $\tau = 1/\lambda_v$ , for each station. Stations ST01 and ST02 show higher residence times, 18.4 and 15.9 days, respectively, while ST03 and ST04 present close but lower values between them, 8.7 and 8.8 days, respectively.

Table 4  
 Correlation coefficients with external parameters

	$T_e - T_m$				Atmospheric pressure			
	ST01	ST02	ST03	ST04	ST01	ST02	ST03	ST04
$T_a$	0.6	0.8	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	0.4	0.5
$T_s$	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.1	0.4	0.1
$[\text{CO}_2]$	0.6	0.8	0.8	0.5	-0.4	-0.1	-0.3	-
$[\text{Rn}]$	0.5	0.7	0.6	0.5	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4

$T_a$  and  $T_s$  stand for air and soil temperature, respectively and,  $[\text{CO}_2]$  and  $[\text{Rn}]$  are carbon dioxide and radon concentrations in air, respectively

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

Table 5

Ventilation and accumulation parameters for radon and carbon dioxide

Station	Radon		$\lambda_v/\lambda$	$\tau$ (d)	CO <sub>2</sub>	
	$^{222}\text{Rn}$ warm period (cpm)	$^{222}\text{Rn}$ cold period (cpm)			$\beta$ (day)	$\Psi$ (ppm/day)
ST01	40	30	0.3	18.4	28.4	95.5
ST02	103	76	0.35	15.9	29.6	246.0
ST03	211	129	0.63	8.7	36.7	260.1
ST04	323	199	0.62	8.8	18.3	92.4

4.10.2 Carbon Dioxide Accumulation

The stagnation process of CO<sub>2</sub> concentration in air during the warm period can be modeled by an exponential curve (Perrier and Richon 2010). Its general form is:

$$[\text{CO}_2] = \alpha(1 - e^{-t/\beta}) + \gamma, \quad (2)$$

where  $\alpha, \beta$  and  $\gamma$  are constants. The most important parameter is  $\beta$ , the characteristic time. It represents the time at which 63% saturation is reached. The CO<sub>2</sub> concentration was fitted for every station following Eq. (2). Results for  $\beta$  are shown in Table 5. The highest value, 36.7 days was measured at ST03, while the lowest, 18.3 days occurred at ST04. Stations ST01 and ST02 show similar values, 28.4 and 29.6 days, respectively.

If Eq. (2) is differentiated with respect to time, an approximate CO<sub>2</sub> accumulation rate is found:

$$\frac{\partial[\text{CO}_2]}{\partial t} = \frac{\alpha}{\beta} (e^{-t/\beta}) \quad (3)$$

A more comprehensive description can be provided by comparing the ratio  $\alpha/\beta$  among stations. This ratio that we named 'flux rate',  $\psi$ , provides an estimated CO<sub>2</sub> increase rate as shown in Table 5 for. The highest  $\psi$  values are those at ST03 and ST02, 260.1 and 246 ppm/day, respectively. ST01 and ST04 show very similar values.

5. Discussion

Since the profiles were carried out in all seasons it is possible to state that the temperature distribution inside the gallery was very stable (Fig. 2a, b). That is not the case for CO<sub>2</sub> due to its dependence on

external meteorological parameters, mainly barometric pressure and external temperature (Eff-Darwich et al. 2002; Perrier et al. 2003; Martin-Luis et al. 2015).

To explain the variability in the CO<sub>2</sub> profiles, natural air ventilation must be considered. This natural process has been widely described in caves and underground systems (Eff-Darwich et al. 2008; Perrier et al. 2003; Perrier and Richon 2010; Faimon et al. 2011). When outside temperatures were lower than  $T_m$  (cold periods), a natural ventilation process involves atmospheric air entering the gallery and diluting the internal gas concentration (Milanolo and Gabrovšek 2009; Perrier and Richon 2010; Gregorič et al. 2011). Therefore, 'flat profiles' (P1, P3, P6 and P7) were recorded. In contrast, when the temperature outside the gallery remained higher than  $T_m$ , the natural ventilation process was canceled facilitating gas accumulation (Milanolo and Gabrovšek 2009; Perrier and Richon 2010; Gregorič et al. 2011). Under these conditions, CO<sub>2</sub> was accumulated inside the gallery (profiles P2, P4 and P5).

As mentioned, the main characteristic in the profiles dataset is the MTP or thermal anomaly located at 2000 m from the entrance of the gallery. Its location, coincident with a dike structure, suggests a probably volcanic origin. That zone was the largest dike intrusion structure identified inside the gallery (Farrujia 1989), meaning that multiple magma injections took place. Therefore, at that deep, it could be present an active volcano-tectonic area, coincident with main NW rift direction (Carracedo et al. 2007), allowing repeated magma and volcanic fluids ascent (Salvatore Giammanco et al. 1999; Viveiros et al. 2017). Chiodini et al. (2001) named these kinds of structures as diffuse degassing structures (DDS). This source was confirmed by  $\delta^{13}\text{C}$  (CO<sub>2</sub>) ratios measured

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

189 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

inside the gallery at two sites (Sect. 4.3). The CO<sub>2</sub> concentration and carbon isotope ratios point to a deep origin source (Chiadini et al. 2008), Table 2. Hernández et al. (2017) reported data for  $\delta^{13}\text{C}$  (CO<sub>2</sub>) at the NW rift. The values registered in their annual surveys, from 2011 to 2016, ranged from  $-28.7\%$  to  $-6.5\%$ . Their maximum, attributed to a magmatic contribution, agrees well with those (Table 2).

Hence, the three different datasets: profiles, geological description of the gallery (Fig. 1c), and  $\delta^{13}\text{C}$  (CO<sub>2</sub>) ratios, confirm that the main CO<sub>2</sub> source inside the gallery, with a clear magmatic origin, was located around 2000 m inward from the entrance. Volcanotectonic area or DDS found at that depth, which may be related to MCT and MC eruptions (Fig. 4 and Sect. 4.1), appear to have created a preferential path for ascending magmatic gases (Finizola et al. 2002; Barde-Cabusson et al. 2009).

Once the location and origin of the gas source is determined, a conceptual model for the gallery can be proposed, based on all the datasets. This model is an attempt to qualitatively describe both temperature distributions and gas dynamics inside the gallery. The model has been divided into two, based on differences found between cold and warm periods. Figure 8a shows the proposed model for cold period (when  $T_e < T_m$ ). The average temperature profile of the gallery was plotted (Fig. 2c, Sect. 4.1). Background levels of carbon dioxide (white line) and radon concentration (pink line) profiles along the gallery are shown. The CO<sub>2</sub> profile is based on cold periods. Rn profile is derived from the stations dataset (background levels during cold periods).

When  $T_e < T_m$ , outside air is colder and denser than air inside the gallery, which is slightly warm and lighter. A natural ventilation process takes place (Milanolo and Gabrovšek 2009; Gregorič et al. 2011; Perrier and Richon 2010). Hence, atmospheric air enters the gallery diluting the internal atmosphere, reducing both gas concentrations to background levels at all stations (Sect. 4.3.1) (Milanolo and Gabrovšek 2009; Perrier and Richon 2010; Gregorič et al. 2011). Carbon dioxide showed almost the same base level at all stations (Fig. 5d), but for Rn there was a clear change in background level between ST01 and ST02 (Fig. 5e). This difference could be linked to a change in petrology of the RdG gallery

(Farrujia 1989) between 1000 and 1600 m. Maybe, an increase in uranium content of rocks at that depth, as several authors have measured in the west flank of Pico Viejo (Oversby et al. 1971; Neumann et al. 1999), could explain the change in radon background level.

In order to estimate the ventilation regimen during periods with  $T_e < T_m$ , residence times ( $\tau$ ), at every station were calculated in Sect. 4.6.1 (Table 5) (Perrier et al. 2003). Once more, there is a wide difference between stations located outward and inward from MTP. The outward stations show a residence time double that of inward ones. It is unusual for the deepest stations to show lower residence times. In fact, the opposite was expected (Perrier et al. 2003; Perrier and Richon 2010). These residence time values should be confirmed by additional research work.

Temperature trends suggest a heat transfer took place towards the deepest part of the gallery. Both soil and air temperatures at ST01 and ST02 showed a decrease due to cold air arriving from the gallery entrance. When this gas passed the MTP (2000 m), it warmed up and continued its path toward the innermost part of the gallery, resulting in temperature increases at ST03 and ST04 (Figs. 4, 5a, b, Sect. 4.3.2, cold period). Therefore, a slight heat transfer could explain the temperature increase at stations inward from MTP.

Figure 8b illustrates the model for the warm period and the short accumulation processes during cold periods.

When  $T_e > T_m$ , atmospheric air is warmer and lighter than air inside the gallery and there is no natural ventilation (Milanolo and Gabrovšek 2009; Gregorič et al. 2011; Perrier and Richon 2010). In the absence of this airflow inside the gallery, heat transfer inwards from MTP was cancelled. Hence, temperatures at ST03 and ST04 decreased as a consequence of the natural cooling process. In contrast, at ST01 and ST02 there was an increase following the seasonal trend outside the gallery (Sect. 4.3.2, warm period). These two different trends, outward and inward from MTP, are described by positive correlations for ST01 and ST02, and negative for ST03 and ST04, with respect to  $T_e - T_m$  (Table 4).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

190 / 229

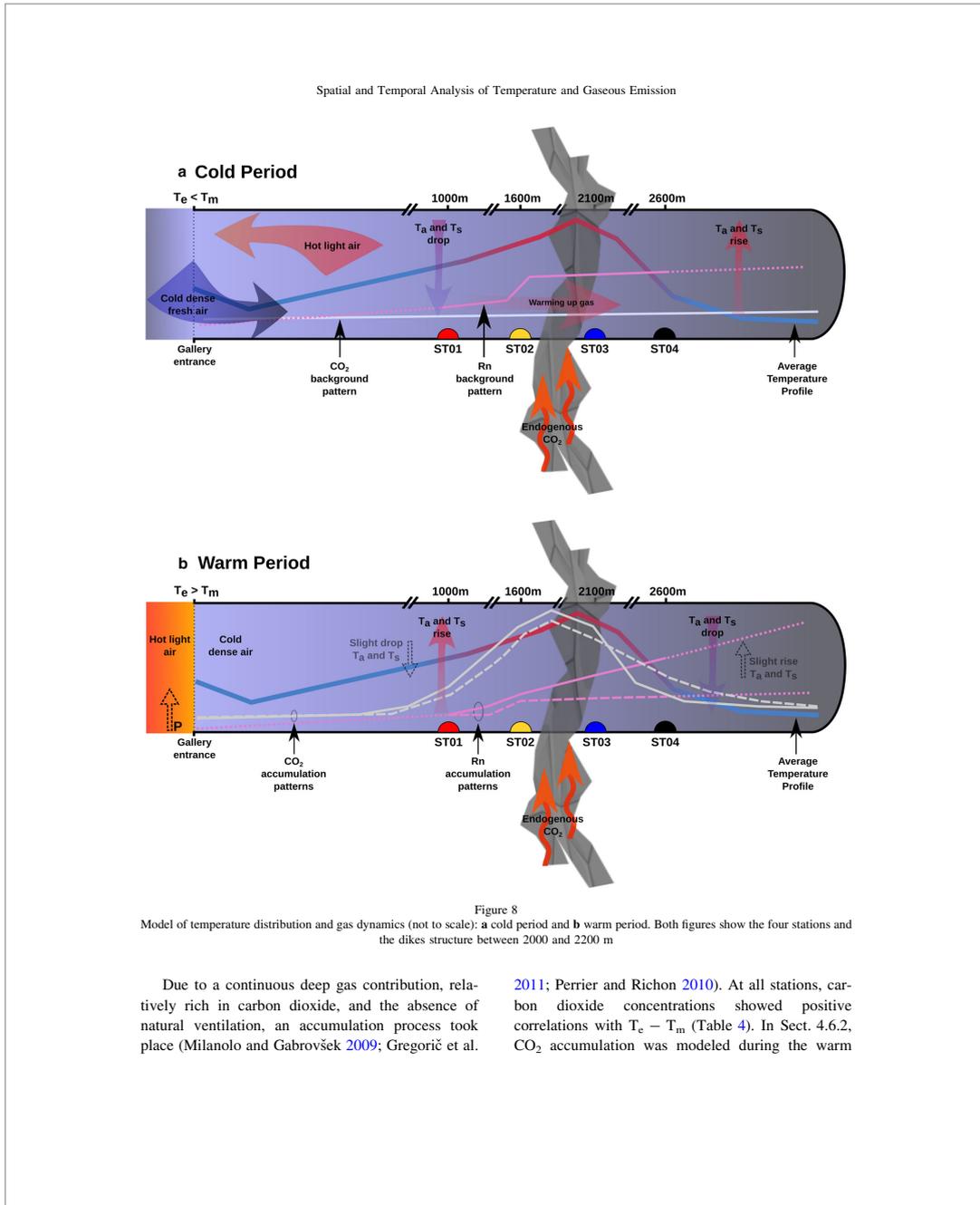
Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

190 / 229



Due to a continuous deep gas contribution, relatively rich in carbon dioxide, and the absence of natural ventilation, an accumulation process took place (Milanolo and Gabrovšek 2009; Gregorič et al.

2011; Perrier and Richon 2010). At all stations, carbon dioxide concentrations showed positive correlations with  $T_e - T_m$  (Table 4). In Sect. 4.6.2, CO<sub>2</sub> accumulation was modeled during the warm

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

period (Perrier and Richon 2010). The highest characteristic times,  $\beta$ , were found at ST02 and ST03 as expected (Table 5) since both stations showed the highest CO<sub>2</sub> concentration in the warm period. More important is the flux rate,  $\Psi$ . Its highest values are present at ST02 and ST03 (Table 5), indicating that the area emitting most CO<sub>2</sub> inside the gallery was located between these two stations.

A clear difference between CO<sub>2</sub> and Rn accumulation profiles was again found. The CO<sub>2</sub> accumulation pattern along the gallery, with its maximum point between ST02 and ST03, can be explained by the presence of MTP. Radon concentration showed no clear absolute maximum, at least in the gallery section covered by stations where the maximum CO<sub>2</sub> and temperature values were located. Its emission was probably related to a diffuse process along the gallery, without a clear emission point, and was unrelated to CO<sub>2</sub> emission (Martin-Luis et al. 2015). This diffuse emission is greater with depth (Fig. 4e), apparently due to a probable structural change between 1000 and 1600 m as the geological description suggests (Fig. 1c) (Farrujia 1989).

During the warm period and in short accumulation processes in cold periods a pressure effect was identified (Sect. 4.3.2). In both periods, natural air ventilation was canceled since  $T_e > T_m$  (Milanolo and Gabrovšek 2009; Gregorič et al. 2011; Perrier and Richon 2010). Under these conditions, it can be assumed that the air inside the gallery remained isolated from outside. In Fig. 8b, the effect of an increase in barometric pressure is shown with dashed arrows (temperatures) and lines (gases).

This advective movement had a predominant semi-diurnal period as the spectrum data indicated (Sect. 4.4), and was higher for CO<sub>2</sub> than Rn. When barometric pressure rose continuously, it created an advective movement (Pinault and Baubron 1997; Massman 2006; Perrier and Girault 2013; Perrier and Le Mouél 2016) that pushed gas towards to the end part of the gallery. Since the gallery walls are porous, air can flow through them. Hence, at ST01 and ST02 low-temperature air arrived with low CO<sub>2</sub> and Rn concentrations. Consequently, their temperatures and both gas concentrations decreased (negative correlation, Table 4), these latter due to a dilution process (Kowalczk and Froelich 2010; Perrier and Richon

2010; Gregorič et al. 2011). At ST03, carbon dioxide also decreased since ST02 usually showed a lower concentration. In contrast, both temperatures at ST03 rose due to a heat transfer by gas passing through MTP (Sect. 4.3.2 warm period). Station ST04 also showed a slight temperature increase due to the same heat transfer, but its CO<sub>2</sub> concentration was also increased. Taking into account the shape of the CO<sub>2</sub> profile during the accumulation process (Fig. 2c), that concentration increase at ST04 could be a consequence of a relatively high CO<sub>2</sub> concentration coming from ST03. The carbon dioxide profile peak underwent an inward expansion as well as a slight decrease in its maximum as stations dataset suggests (white dashed line Fig. 8b).

Regarding radon, all stations showed a decreasing trend during an air pressure increase. Concentration values at ST02, ST03 and ST04 dropped to approximately the same level (pink dashed line in Fig. 8b). Base on stations data, when the internal gas moved inwards, each station received a lower radon concentration from outer areas of the gallery. The difference found between ST01 and the other stations was probably due to a change in lithology of the gallery between 1000 and 1600 m, as already mentioned.

When atmospheric pressure decreased, the gas inside the gallery could not move outwards freely due to a thermal plug at the entrance,  $T_e > T_m$  (Milanolo and Gabrovšek 2009; Kowalczk and Froelich 2010). Therefore, advective outward movement was weak or even null and the suction effect was negligible.

## 6. Conclusions

Caves, galleries and other underground cavities have been widely used to measure a variety of geophysical and geochemical parameters. In order to obtain useful information, measurement stations must be appropriately placed and configured properly.

In this paper we present, the finding of a thermal anomaly, MTP, inside a water-mine gallery in Tenerife. A clear CO<sub>2</sub> emission related to this MTP was identified, and the  $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$  isotopic ratio results pointed to a deep source origin of this gas. However, radon levels were not found to be linked with MTP. Based on the continuous stations dataset, its source seemed to be diffuse along the gallery.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

The influence of this thermal anomaly on the dynamics of the gallery was studied. This MTP divided the gallery into two sections with different behavior during the entire recorded period. In addition, we assessed the influence of the external parameters, barometric pressure and external temperature. As result, background values for all parameters were identified and a conceptual model was proposed for gas and temperature dynamics.

These results are useful to improve the volcanic monitoring program in the Canary Islands, and indicate that a permanent continuous station should be deployed inside this strategic gallery. The analysis of its data will facilitate identifying anomalous signals in these parameters that may be related to changes in volcanic activity.

Galleries are suitable places to deploy instrumentation to measure several interesting parameters. Despite the clear advantages of greatly reducing the influence from external weather conditions, the possible existence of internal thermal anomalies must be taken into account, which could change the ordinary or expected gas and temperature trends inside the gallery. This is important in galleries where there is instrumentation for volcanic monitoring or other research tasks, especially when there are personnel working inside.

Acknowledgements

The authors wish to thank the staff of the Centro Geofísico de Canarias for their excellent work and support during this field work. This study was funded by the Instituto Geográfico Nacional (Ministerio de Fomento, Spanish Government).

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

REFERENCES

Aiuppa, A., Bertagnini, A., Métrich, N., Moretti, R., Di Muro, A., Liuzzo, M., et al. (2010). A model of degassing for Stromboli volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1), 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.040>.

Albert-Beltrán, J. F., Araña, V., Díez, J. L., & Valentín, A. (1990). Physical-chemical conditions of the Teide volcanic system (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43(1), 321–332. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90059-0).

Almendros, J., Ibáñez, J. M., Carmona, E., & Zandomenighi, D. (2007). Array analyses of volcanic earthquakes and tremor recorded at Las Cañadas caldera (Tenerife Island, Spain) during the 2004 seismic activation of Teide volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(3), 285–299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.10.002>.

Alparone, S., Behncke, B., Giammanco, S., Neri, M., & Privitera, E. (2005). Paroxysmal summit activity at Mt. Etna (Italy) monitored through continuous soil radon measurements. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2005GL023352>.

Arpa, M. C., Hernández, P. A., Padrón, E., Reniva, P., Padilla, G. D., Bariso, E., et al. (2013). Geochemical evidence of magma intrusion inferred from diffuse CO<sub>2</sub> emissions and fumarole plume chemistry: the 2010–2011 volcanic unrest at Taal Volcano, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 75(10), 747. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0747-9>.

Atkinson, T. C., Smart, P. L., & Wigley, T. M. L. (1983). Climate and natural radon levels in castleguard cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15(4), 487–502. <https://doi.org/10.1080/00040851.1983.12004376>.

Aware Electronics. (2018). RM specs. <https://www.aw-el.com/specs.htm>.

Barbosa, S. M., Steinitz, G., Piatibratova, O., Silva, M. E., & Lago, P. (2007). Radon variability at the Elat granite, Israel: Heteroscedasticity and nonlinearity. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2007GL030065>.

Barde-Cabusson, S., Finizola, A., Revil, A., Ricci, T., Piscitelli, S., Rizzo, E., et al. (2009). New geological insights and structural control on fluid circulation in La Fossa cone (Vulcano, Aeolian Islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(3), 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.06.002>.

CIATF, C. I. d. A. d. T. (2018). Consejo Insular de Aguas de Tenerife. <https://www.aguastenerife.org/>.

Carracedo, J. C. (1994). The canary islands: An example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60(3), 225–241. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90053-1).

Carracedo, J. C., Badiola, E. R., Guillou, H., Paterno, M., Scaillet, S., Torrado, F. J. P., et al. (2007). Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *GSA Bulletin*, 119(9–10), 1027–1051. <https://doi.org/10.1130/B26087.1>.

Carracedo, J. C., Guillou, H., Nomade, S., Rodríguez-Badiola, E., Pérez-Torrado, F. J., Rodríguez-González, A., et al. (2011). Evolution of ocean-island rifts: The northeast rift zone of Tenerife, Canary Islands. *GSA Bulletin*, 123(3–4), 562–584. <https://doi.org/10.1130/B30119.1>.

Cerdeña, I. D., del Fresno, C., & Rivera, L. (2011). New insight on the increasing seismicity during Tenerife's 2004 volcanic reactivation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.005>.

Chiodini, G., Caliro, S., Cardellini, C., Avino, R., Granieri, D., & Schmidt, A. (2008). Carbon isotopic composition of soil CO<sub>2</sub> efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO<sub>2</sub> degassing in volcanic-hydrothermal areas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

P. Torres-González et al.

Pure Appl. Geophys.

- Earth and Planetary Science Letters*, 274(3), 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.051>.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., & Marini, L. (1998). Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5), 543–552. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0).
- Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., & Ventura, G. (2001). CO<sub>2</sub> degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B8), 16213–16221. <https://doi.org/10.1029/2001JB000246>.
- Chiodini, G., Frondini, F., & Raco, B. (1996). Diffuse emission of CO<sub>2</sub> from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). *Bulletin of Volcanology*, 58(1), 41–50. <https://doi.org/10.1007/s004450050124>.
- Cigolini, C., Gervino, G., Bonetti, R., Conte, F., Laiolo, M., Coppola, D., et al. (2005). Tracking precursors and degassing by radon monitoring during major eruptions at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2005GL022606>.
- Cigolini, C., Laiolo, M., & Coppola, D. (2007). Earthquake-volcano interactions detected from radon degassing at Stromboli (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3), 511–525. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.022>.
- Cox, M. E., Cuff, K. E., & Thomas, D. M. (1980). Variations of ground radon concentrations with activity of Kilauea Volcano, Hawaii. *Nature*, 288, 74. <https://doi.org/10.1038/288074a0>.
- Delfa, S. L., Agostino, I., Morelli, D., & Patanè, G. (2008). Soil radon concentration and effective stress variation at Mt. Etna (Sicily) in the period January 2003–April 2005. *Radiation Measurements*, 43(7), 1299–1304. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.02.004>.
- Eff-Darwich, A., Martín-Luis, C., Quesada, M., de la Nuez, J., & Coello, J. (2002). Variations on the concentration of <sup>222</sup>Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 2069. <https://doi.org/10.1029/2002GL015387>.
- Eff-Darwich, A., Viñas, R., Soler, V., de la Nuez, J., & Quesada, M. L. (2008). Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring. *Radiation Measurements*, 43(8), 1429–1436. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.05.006>.
- Faimon, J., Troppová, D., Baldík, V., & Novotný, R. (2011). Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *International Journal of Climatology*, 32(4), 599–623. <https://doi.org/10.1002/joc.2298>.
- Falsaperla, S., Behncke, B., Langer, H., Neri, M., Salerno, G. G., Giammanco, S., et al. (2014). “Failed” eruptions revealed by pattern classification analysis of gas emission and volcanic tremor data at Mt Etna, Italy. *International Journal of Earth Sciences*, 103(1), 297–313. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0964-7>.
- Farrujia, I. (1989). *Informe hidrogeológico galería Río de Guía (Vol. Planificación Hidráulica del Cabildo de Tenerife)*. Santa Cruz de Tenerife: Consejo Insular Aguas de Tenerife.
- Finizola, A., Sortino, F., Lénat, J.-F., & Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO<sub>2</sub> surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00327-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00327-4).
- Giammanco, S., Gurrieri, S., & Valenza, M. (1999). Geochemical investigations applied to active fault detection in a volcanic area: the North–East Rift on Mt. Etna (Sicily, Italy). *Geophysical Research Letters*, 26(13), 2005–2008. <https://doi.org/10.1029/1999GL900396>.
- Giammanco, S., Immè, G., Mangano, G., Morelli, D., & Neri, M. (2009). Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Permian fault system, Mt. Etna (Italy). *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1), 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.09.007>.
- Gregorič, A., Zidanšek, A., & Vaupotič, J. (2011). Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1523–1528. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1523-2011>.
- Hernández, P. A., Padilla, G., Barrancos, J., Melián, G., Padrón, E., Asensio-Ramos, M., et al. (2017). Geochemical evidences of seismo-volcanic unrests at the NW rift zone of Tenerife, Canary Islands, inferred from diffuse CO<sub>2</sub> emission. *Bulletin of Volcanology*, 79(4), 30. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1109-9>.
- Hernández, P., Pérez, N., Salazar, J., Sato, M., Notsu, K., & Wakita, H. (2000). Soil gas CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub> distribution in and around Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1), 425–438. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00235-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00235-3).
- Kowalczyk, A. J., & Froelich, P. N. (2010). Cave air ventilation and CO<sub>2</sub> outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe? *Earth and Planetary Science Letters*, 289(1), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.010>.
- Laiolo, M., Ranaldi, M., Tarchini, L., Carapezza, M. L., Coppola, D., Ricci, T., et al. (2016). The effects of environmental parameters on diffuse degassing at Stromboli volcano: Insights from joint monitoring of soil CO<sub>2</sub> flux and radon activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 315, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.004>.
- Liuzzo, M., Gurrieri, S., Giudice, G., & Giuffrida, G. (2013). 10 years of soil CO<sub>2</sub> continuous monitoring on Mt Etna: Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8), 2886–2899. <https://doi.org/10.1002/ggge.20196>.
- López, C., Blanco, M. J., Abella, R., Brenes, B., Cabrera Rodríguez, V. M., Casas, B., et al. (2012). Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption. *Geophysical Research Letters*, 39(13), 1. <https://doi.org/10.1029/2012GL051846>.
- Martí, J., & Gudmundsson, A. (2000). The Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands): An overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1), 161–173. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00221-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00221-3).
- Martín-Luis, C., Quesada, M., Eff-Darwich, A., De la Nuez, J., Coello, J., Ahijado, A., et al. (2002). A new strategy to measure radon in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands). *Environmental Geology*, 43(1), 72–78. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0606-z>.
- Martín-Luis, M. C., Steinitz, G., Soler, V., Quesada, M. L., & Casillas, R. (2015). <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub> at Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *The European Physical Journal Special Topics*, 224(4), 641–657. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02397-7>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

194 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission

- Massman, W. J. (2006). Advective transport of CO<sub>2</sub> in permeable media induced by atmospheric pressure fluctuations: 1. An analytical model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2006JG000163>.
- Melián, G., Tassi, F., Pérez, N., Hernández, P., Sortino, F., Vaselli, O., et al. (2012). A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide Volcano (Tenerife, Canary Islands): A geochemical evidence for the 2004–2005 seismic–volcanic crisis. *Bulletin of Volcanology*, 74(6), 1465–1483. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0613-1>.
- Milanolo, S., & Gabrovšek, F. (2009). Analysis of carbon dioxide variations in the atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina. *Boundary-Layer Meteorology*, 131(3), 479–493. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9375-5>.
- Neri, M., Ferrera, E., Giammanco, S., Currenti, G., Cirrincione, R., Patané, G., et al. (2016). Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Scientific Reports*, 6, 24581.
- Neumann, E. R., Wulff-Pedersen, E., Simonsen, S. L., Pearson, N. J., Martí, J., & Mitjavila, J. (1999). Evidence for fractional crystallization of periodically refilled magma Chambers in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 40(7), 1089–1123. <https://doi.org/10.1093/ptro/40.7.1089>.
- Notsu, K., Sugiyama, K., Hosoe, M., Uemura, A., Shimoiike, Y., Tsunomori, F., et al. (2005). Diffuse CO<sub>2</sub> efflux from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(3), 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.08.003>.
- Oversby, V. M., Lancelot, J., & Gast, P. W. (1971). Isotopic composition of lead in volcanic rocks from Tenerife, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*, 76(14), 3402–3413. <https://doi.org/10.1029/JB076i014p03402>.
- Padrón, E., Pérez, N. M., Rodríguez, F., Melián, G., Hernández, P. A., Sumino, H., et al. (2015). Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology*, 77(4), 28. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0914-2>.
- Pérez, N. M., Hernández, P. A., Padrón, E., Melián, G., Marrero, R., Padilla, G., et al. (2007). Precursory subsurface <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Rn degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 164(12), 2431–2448. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0280-x>.
- Perrier, F., & Girault, F. (2013). Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations. *Geophysical Journal International*, 195(2), 945–971. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt280>.
- Perrier, F., & Le Mouél, J.-L. (2016). Stationary and transient thermal states of barometric pumping in the access pit of an underground quarry. *Science of the Total Environment*, 550, 1044–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.125>.
- Perrier, F., Morat, P., & Le Mouél, J.-L. (2001). Pressure induced temperature variations in an underground quarry. *Earth and Planetary Science Letters*, 191(1), 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00411-3).
- Perrier, F., & Richon, P. (2010). Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(4), 279–296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.12.003>.
- Perrier, F., Richon, P., Crouzeix, C., Morat, P., & Le Mouél, J.-L. (2003). Radon-222 signatures of natural ventilation regimes in an underground quarry. *Journal of Environmental Radioactivity*, 71(1), 17–32. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00117-6).
- Perrier, F., Richon, P., Gautam, U., Tiwari, D. R., Shrestha, P., & Sapkota, S. N. (2007). Seasonal variations of natural ventilation and radon-222 exhalation in a slightly rising dead-end tunnel. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2), 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.06.003>.
- Pinault, J.-L., & Baubron, J.-C. (1997). Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: A new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18101–18120. <https://doi.org/10.1029/97JB00971>.
- Pineau, F., & Javoy, M. (1983). Carbon isotopes and concentrations in mid-oceanic ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(2), 239–257. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90087-0).
- Prutkin, I., Vajda, P., & Gottsmann, J. (2014). The gravimetric picture of magmatic and hydrothermal sources driving hybrid unrest on Tenerife in 2004/5. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 282, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.003>.
- Richon, P., Sabroux, J.-C., Halbwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J., et al. (2003). Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophysical Research Letters*, 30(9), 1. <https://doi.org/10.1029/2003GL016902>.
- Romero Ruiz, C. (1989). *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*. La Laguna: Tesis Universidad de La Laguna.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2012). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley.
- SenseAir. (2018). aSENSE. <https://senseair.com/products/asense/asense-display/>.
- Steinitz, G., Martín-Luis, M. C., & Piatibratova, O. (2015). Indications for solar influence on radon signal in the subsurface of Tenerife (Canary Islands, Spain). *The European Physical Journal Special Topics*, 224(4), 687–695. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02399-5>.
- Troll, V. R., & Carracedo, J. C. (2016). chapter 5 - The Geology of Tenerife. In V. R. Troll & J. C. Carracedo (Eds.), *The Geology of the Canary Islands* (pp. 227–355). Amsterdam: Elsevier.
- Viñas, R., Eff-Darwich, A., Soler, V., Martín-Luis, M. C., Quesada, M. L., & de la Nuez, J. (2007). Processing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Radiation Measurements*, 42(1), 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.002>.
- Viveiros, F., Marcos, M., Faria, C., Gaspar, J. L., Ferreira, T., & Silva, C. (2017). Soil CO<sub>2</sub> degassing path along volcano–tectonic structures in the Pico–Faial–São Jorge Islands (Azores Archipelago, Portugal). *Frontiers in Earth Science*, 5(50), 1. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00050>. [Original Research].

(Received January 16, 2019, revised March 11, 2019, accepted March 19, 2019)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

195 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

196 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Apéndice B

### Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption

*Revista:*

Journal of Volcanology and Geothermal Research

*Autores:*

Pedro Torres González<sup>1</sup>

David Moure García<sup>1</sup>

Natividad Luengo-Oroz<sup>1</sup>

Víctor Villasante-Marcos<sup>2</sup>

Ilazkiñe Iribarren<sup>1</sup>

M. José Blanco<sup>1</sup>

Vicente Soler<sup>3</sup>

Ana Jiménez-Abizanda<sup>4</sup>

José García-Fraga<sup>4</sup>

1) Centro Geofísico de Canarias, IGN

2) Observatorio Geofísico Central, IGN

3) Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC

4) Departamento Química (UD Química Analítica), ULL

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.018>

197

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <a href="https://sede.ull.es/validacion/">https://sede.ull.es/validacion/</a></i>	
Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

197 / 229

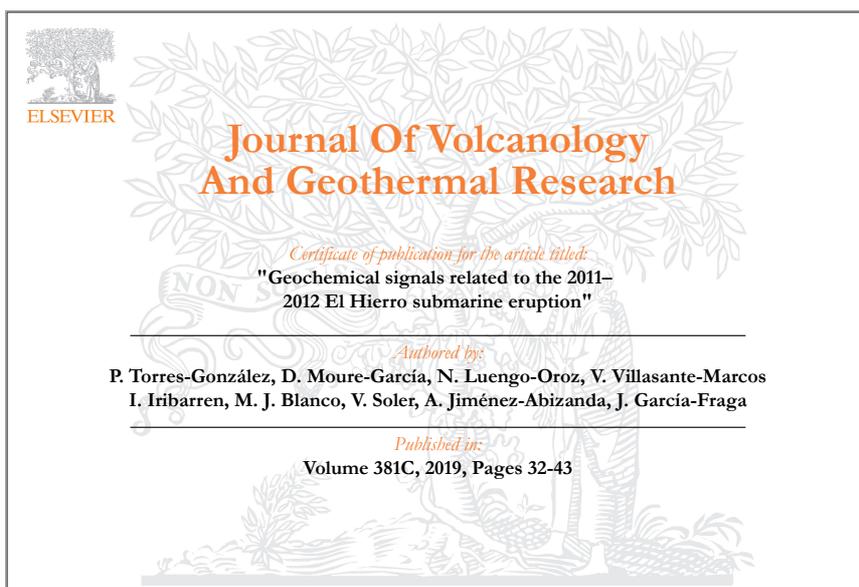
Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

197 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

198 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Volcanology and Geothermal Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jvolgeores](http://www.elsevier.com/locate/jvolgeores)



## Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption

Pedro Torres-González<sup>a,\*</sup>, David Moure-García<sup>a</sup>, Natividad Luengo-Oroz<sup>a</sup>, Víctor Villasante-Marcos<sup>b</sup>, Ilazkiñe Iribarren<sup>a</sup>, M. José Blanco<sup>a</sup>, Vicente Soler<sup>c</sup>, Ana Jiménez-Abizanda<sup>d</sup>, José García-Fraga<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Instituto Geográfico Nacional, Centro Geofísico de Canarias, C/ La Marina 20, 2º, 38001 Santa Cruz de Tenerife, Spain

<sup>b</sup> Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico Central, C/ Alfonso XII, 3, 28014 Madrid, Spain

<sup>c</sup> Instituto de Productos Naturales y Agrobiología CSIC, Estación Volcanológica de Canarias, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, 3, 38203 San Cristóbal de la Laguna, Spain

<sup>d</sup> Universidad de La Laguna, Facultad de Ciencias, Departamento Química (UD Química Analítica), Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, 38200 San Cristóbal de la Laguna, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 October 2018

Received in revised form 15 May 2019

Accepted 16 May 2019

Available online 25 May 2019

#### Keywords:

El Hierro

CO<sub>2</sub> and radon

Ground deformation

Unrest

Eruption

Galleries and wells

### ABSTRACT

On 10 October 2011, a submarine volcanic eruption began 2 km south of the island of El Hierro (Canary Islands, Spain). It was the first eruption after 40 years of quiescence in the Canarian archipelago. Since mid-July 2011, a multiparametric network has been deployed by the Instituto Geográfico Nacional (hereinafter IGN) to monitor volcanic processes. The data recorded by five stations, measuring the air and soil temperature, CO<sub>2</sub> and radon concentration in the air inside four galleries and one well, are the focus of the present paper. Two important anomalies were found that improve comprehension of the volcanic process. First, a clear increase in CO<sub>2</sub> concentration in one gallery (from 825 ± 19 to 2305 ± 35 ppm) which seems to be mainly controlled by ground deformation measured during the unrest period preceding the eruption. Second, a relationship between radon concentration in air in a well located in the northern side of the island with seismic energy release (several peaks with up to 115% increase), and ground deformation (50% growth in background level), also before the eruption onset. Lastly, changes in radon concentration during eruptive period seem to be modulated by seismic activity (increases up to 233%), which in turn is likely related to variations in magma rheology.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Monitoring gas emissions in active volcanic areas is one of the most important tasks in volcano surveillance along with seismology and geodetic techniques. It provides useful information about volcano activity status during quiescent periods, unrest periods and volcanic eruptions (Chiodini et al., 2001; Martín-Luis et al., 2002; Hernandez et al., 2004; Caracausi et al., 2005; Notsu et al., 2006; Arpa et al., 2013; Liuzzo et al., 2013). Among the large number of chemical species emitted in an active volcanic area, temporal and spatial variations in CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn fluxes and concentrations have been shown to be useful for understanding volcanic processes (Alparone et al., 2005; Carapezza et al., 2009; Cigolini et al., 2013; Neri et al., 2016; Laiolo et al., 2016; Falsaperla et al., 2017).

Following water vapor, CO<sub>2</sub> is the second most abundant gas in volcanic fluids and magmas (Gerlach and Nordlie, 1975; Gerlach and Graeber, 1985). Due to its low solubility in silicate melts, it is one of the first gases released from magma during its ascent and there is often substantial CO<sub>2</sub> release even under quiescent conditions (Chiodini et al., 1998, 2001; Soler et al., 2004; Notsu et al., 2005, 2006; Padrón et al., 2008; Arpa et al., 2013; Padrón et al., 2015). Fumaroles are often preferential exit

paths for CO<sub>2</sub> but it is also released as widespread diffuse emissions (Chiodini et al., 1996, 1998, 2001; Notsu et al., 2005; Padrón et al., 2008). Carbon dioxide can also interact with groundwater, changing physico-chemical properties (Brusca et al., 2001; Capasso et al., 2001; Marrero et al., 2008). It is very important to measure and quantify CO<sub>2</sub> emissions through fumaroles, soils and water in order to better understand active volcanic areas. (Notsu et al., 2005; Lewicki et al., 2005; Notsu et al., 2006; Giammanco et al., 2007; Padrón et al., 2008; Marrero et al., 2008; Carapezza et al., 2009; Aiuppa et al., 2010; Martín-Luis et al., 2015; Padrón et al., 2015; Santana-Casiano et al., 2016).

Radon, <sup>222</sup>Rn, is a radioactive noble gas naturally occurring in the disintegration chain of <sup>238</sup>U with <sup>226</sup>Ra as precursor. With a half-life of 3.82 days, it has a limited range of diffusive movement from its origin, but can be transported further by convection/advection (Cox et al., 1980; Nazaroff, 1992). The source of radon and its transport are influenced by several factors (Soler et al., 2004; Martín-Luis et al., 2015; Kobayashi et al., 2015; Laiolo et al., 2016), so the interpretation of <sup>222</sup>Rn data is challenging. Spatial and temporal variations in <sup>222</sup>Rn concentration may be due to magma injection, microfracturing, variations in rock permeability related to opening or sealing fissures/fractures, and other causes (Richon et al., 2003; Steinitz et al., 2003; Alparone et al., 2005; Cigolini et al., 2005; Pérez et al., 2007; Tuccimei et al., 2010; Mollo et al., 2011; Nicolas et al., 2014; Girault et al., 2017).

\* Corresponding author.

E-mail address: [patorres@fomento.es](mailto:patorres@fomento.es) (P. Torres-González).

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.018>

0377-0273/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

199 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Gas concentrations measured in soils, especially near the surface, may be strongly affected by meteorological parameters such as air and soil temperature, barometric pressure, soil moisture, rainfall and wind (Eff-Darwich et al., 2002; Viveiros et al., 2009; Zafir et al., 2012; Silva et al., 2015; Laiolo et al., 2016). Therefore, in studies of volcanogenic CO<sub>2</sub> and radon emissions it is desirable to reduce these effects as much as possible. In the Canary Islands there are a large number of subhorizontal blind water-mining tunnels or galleries (Martín-Luis et al., 2002; Eff-Darwich et al., 2002; Viñas et al., 2004; Eff-Darwich et al., 2008). With an average cross section of 2 m × 2 m, their lengths vary from a few hundred meters to kilometers. These galleries are ideal locations to reduce the influence of meteorological parameters. Wells can also be used for this purpose. In the

Canaries, wells have an average diameter of 3 m, and depths of up to few hundred meters. On the island of El Hierro, 24 wells and 25 galleries are cataloged by the Island Water Council (Consejo Insular de Aguas de El Hierro, CIATF, 2018). They are located mainly in the north, east and south-east of the island, providing different points to monitor gas dynamics within the island edifice.

In mid-2011 the IGN improved its volcanic monitoring network with eight seismic and nine GNSS stations (Station HI01 used in this work belongs to the IGN network), and added a geochemical network during the unrest period (from mid-July to October 10, 2011) composed of four gallery stations (HVER, HTIN, HTIG and HTAC) and one well station (RSIM) (Fig. 1). The temporal variations in CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn concentration

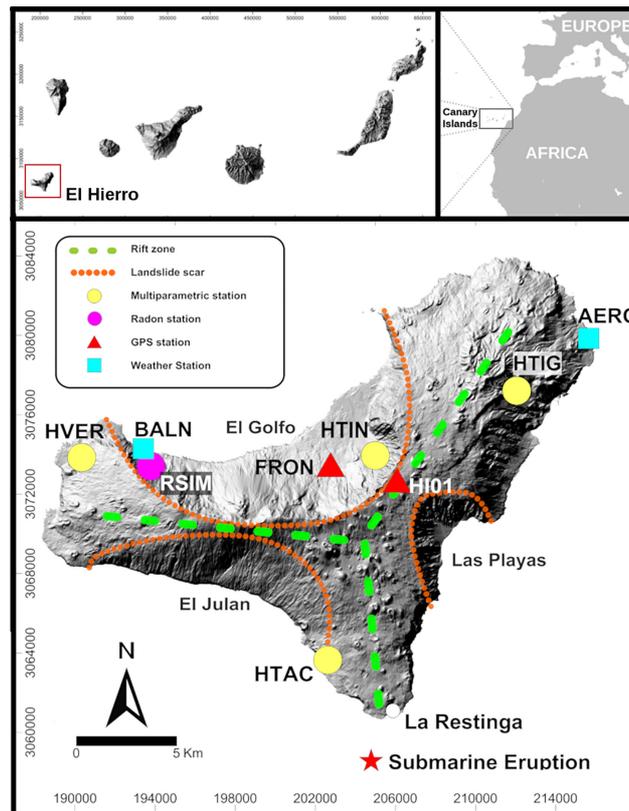


Fig. 1. Geochemical monitoring network on El Hierro: multiparametric stations placed inside galleries (yellow circles) and the radon station in a well (magenta circle). GNSS stations FRON and HI01 (red triangles), AEMET stations (BALN and AERO, blue squares) ("Agencia Estatal de Meteorología - AEMET, Gobierno de España", 2018) and the main geological structures: landslides (orange dashed lines) and rift zones (green dashed lines) are shown. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

200 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
 Fecha: 09/10/2020 05:03:40

are analyzed during both unrest and eruption periods (from October 10, 2011 to March 5, 2012).

## 2. Geological setting

The Canary archipelago (Spain) is located 100 km off the northwest African coast, on the passive margin of the African plate. With a total land area of 7500 km<sup>2</sup> it extends for roughly 500 km in an east-west chain of seven major volcanic islands and a number of smaller islets (Fig. 1) (Troll and Carracedo, 2016a). El Hierro is the south-westernmost, smallest and youngest island in the Canary Islands with the oldest subaerial deposits dated at 1.12 Ma (Troll and Carracedo, 2016a, 2016b). It has an approximate area of 269 km<sup>2</sup>, an estimated total edifice volume of 5500 km<sup>3</sup> and rises about 5500 m from its submarine base (Guillou et al., 1996; Carracedo et al., 2001; Troll and Carracedo, 2016b). The highest point is Malpaso (1501 m.a.s.l.) and the subaerial part is composed of two main volcanic edifices. Tiñor volcano (1.12–0.88 Ma) on the north-east flank and El Golfo volcano (545–176 ka) on the west flank. At least three gravitational collapses have taken place during growth of the island, changing its morphology (Gee et al., 2001; Carracedo et al., 2001; Münn et al., 2006; Becerril et al., 2016). The most recent event was associated with El Golfo (15–13 ka) (Fig. 1; Masson, 1996).

The recent subaerial volcanism consists of monogenetic, mostly effusive magmatic eruptions with basic composition (Carracedo et al., 2001; Troll and Carracedo, 2016b; Becerril et al., 2016). This activity has produced a large number of cinder cones, mainly along the rift zones in the emerged part of the island, and even a greater number on its submarine flanks. One of the most important eruptive episodes occurred around 12 ka ago inside the depression of El Golfo, leaving one of the largest volcanic edifices on the island (Troll and Carracedo, 2016b). The most recent subaerial eruption was that of Volcán de Lomo Negro, in the western part of the island, between 115 BCE and 1602 CE (Villasante-Marcos and Pavón-Carrasco, 2014). In 1793 CE, a seismic crisis was recorded, perhaps

related to a magma intrusion event at depth or a submarine eruption (Villasante-Marcos and Pavón-Carrasco, 2014).

## 3. Submarine Eruption

Beginning on July 19 2011 the IGN seismic network at El Hierro began to detect anomalous seismicity at depths between 8 and 12 km, mainly located in El Golfo area (Fig. 2a) (López et al., 2012). During the following month and a half, seismicity continued in the same zone, accompanied by ground deformation and gas emissions (López et al., 2012; Pérez et al., 2012; Cerdeña et al., 2013; Prates et al., 2013; Padilla et al., 2013; Melián et al., 2014; Meletlidis et al., 2015). During the second fortnight of September there was a clear migration of the seismicity to the south and a magnitude increase (Fig. 2a) (Ibáñez et al., 2012; López et al., 2012). On October 8, a seismic event of M4.4 took place at 14 km depth and 2 km off the southwest coast (del Fresno et al., 2014). One and half days after this earthquake, in the early morning of October 10th, seismicity changed from discrete earthquakes to a continuous tremor signal. The eruption had begun. By this point, >12,000 events had been located and an accumulated vertical deformation of up to 6 cm had been measured at FRON GNSS station (Prates et al., 2013). A submarine eruption was confirmed by visual observations on October 12; a clear light green to brown stain was located on the sea surface about 2 km south of La Restinga village (Fig. 1). Multibeam surveys confirmed that the eruption took place at around 363 m depth, in a NE-SW fissure (Rivera et al., 2013).

Rates and magnitudes of earthquakes increased during the last days of October, leading to a M4.6 event on November 8, the largest in the whole volcanic process. The great majority were located in El Golfo area (Ibáñez et al., 2012; Tárraga et al., 2014; Meletlidis et al., 2015) (Fig. 2b). In the subsequent months, the seismicity and tremor amplitude gradually decreased. The tremor signal completely vanished on February 17 (Tárraga et al., 2014). During the eruption period no

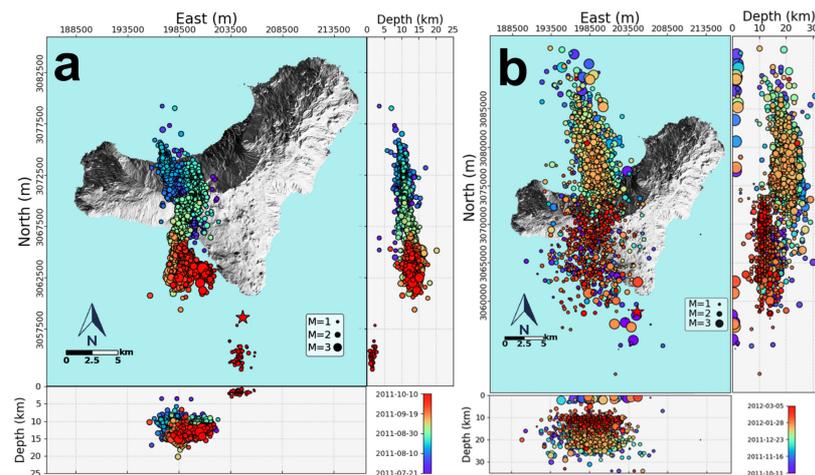


Fig. 2. A) Seismicity relocated by Domínguez Cerdeña et al. (2018) during the unrest period from mid-July to October 10 2011. B) Seismicity located by the IGN network during the submarine eruption period, from the eruption onset date to March 5 2012. Right and bottom panels in A) and B) show depth of seismicity vs. latitude and longitude respectively. Red star marks the eruption location. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javalcoyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

201 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

significant deformation was detected, but increases in the total diffuse CO<sub>2</sub> (Melán et al., 2014) and He emissions (Padrón et al., 2013) were measured. On March 5, the Scientific Committee concluded that the submarine eruption had ended (Gobierno de Canarias, 2012).

During the following two years, there were at least six apparent intrusive events: June–July 2012, September 2012, December 2012, January 2013, March–April 2013, September 2013 and March 2014. All of them were seismic-deformation processes, some with seismicity felt by the population, but none culminated in a volcanic eruption (Carracedo et al., 2015; Domínguez Cerdeña et al., 2018).

#### 4. Methodology

The geochemical monitoring network deployed before and during the eruption is shown in Fig. 1. Four multiparametric stations (HTIN, HVER, HTIG and HTAC) were placed inside four galleries about 400 m from the entrance (Fig. 3a). The first two (HTIN and HVER) measured air and soil temperature, and CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn concentrations in air. The third (HTIG) measured both temperatures but only the <sup>222</sup>Rn concentration in air. This station (HTIG), was moved to the southern coast of the island and renamed HTAC (Fig. 1) when the seismicity migrated southward in mid-September (Fig. 2a). The thermometers to measure air temperature were placed 30–40 cm above ground, whereas the soil thermometers were buried 10 cm deep. The CO<sub>2</sub> concentration sensors and radon monitors were placed on the ground, in the lowest point of the gallery transverse section (Fig. 3a), in order to measure their concentrations in air. The sampling period was 30 min at all of the gallery stations, and they were powered by a 12 V battery.

The fifth station, RSIM (Fig. 1), was deployed inside a 25 deep well with a water table located at 23 m depth (Fig. 3b). The equipment was placed 4 m above the water table and was powered with a 12 V battery. It measured the radon concentration in air inside the well over a sampling period of 10 min.

PT100 probes with an accuracy of ±0.05 °C were used to measure the air and soil temperatures. The CO<sub>2</sub> concentration in air was measured with a NDIR sensor with a measuring range up to 3% and ± 30–3% ppm reading accuracy (SenseAir, 2018). The <sup>222</sup>Rn concentration in air, in counts per minute (cpm), was measured with a radon monitor with ±4 cpm accuracy based on a Geiger tube ("Aware Electronics Corp. RM specs", 2018). Dataloggers developed by the IGN team (Moure-García, 2017) were used with three 16-bit channels, one counter and a SD card as storage system.

In order to remove most of the of the atmospheric temperature and pressure dependence, zero-phase Butterworth low pass filters were applied to CO<sub>2</sub> and radon signals (dark blue and red lines in Fig. 4). This approach does not introduce a time delay in filtered signals and, therefore, is useful to analyze and compare signals showing abrupt changes in short time periods.

#### 5. Results

After a complete analysis of the geochemical network dataset (see supplementary data), variations in the CO<sub>2</sub> and radon concentration in air at HTIN and RSIM stations were found to be related to volcanic activity both prior to and during the submarine eruption. Table 1 includes descriptive statistic from the network.

Station HTIN was installed on July 23. On the first day, carbon dioxide concentration was around 825 ± 19 ppm, the lowest value in its entire record. Until September 7, a smooth increase in CO<sub>2</sub> concentration was recorded (8 ppm/d average rate), rising up to 1170 ± 23 ppm (Fig. 4).

Radon monitor was deployed at RSIM in the last days of August 2011. During the first days of September the radon concentration showed a stable background value of 24 ± 4 cpm. Since the RSIM station was installed at the end of August, the true background level could have been lower (Fig. 4).

On September 7 there was an abrupt increase in CO<sub>2</sub> concentration at HTIN (Fig. 4). There was a 100 ± 12 ppm leap in one day. At the RSIM station there also was a clear change in the radon background level of about 10 ± 4 cpm, almost a 50% increase compared to the previous base level. This new value in the background level was maintained until several days before the eruption onset.

After the abrupt increase in CO<sub>2</sub> concentration on September 7, its value continued rising more rapidly until the eruption onset, on October 10. Carbon dioxide concentration changed from 1170 ± 23 to 1720 ± 29 ppm, an increase of 52% at an average rate of 16 ppm/d.

During the same time period, radon concentration at RSIM exhibited several changes. From September 23 to 24 it showed rapid 50% growth, reaching 45 ± 4 cpm. On September 27, there was a clear and sharp 115% increase, reaching 69 ± 4 cpm. On October 3, the radon concentration at RSIM showed a steep increase. A concentration of 74 ± 4 cpm was reached, which means 114% growth over the background level at that time.

After the eruption onset, CO<sub>2</sub> concentration at HTIN continued rising steadily (4 ppm/d) until January 2 2012, when there was a slight increasing trend (9 ppm/d) reaching 2160 ± 34 ppm. Later, from January

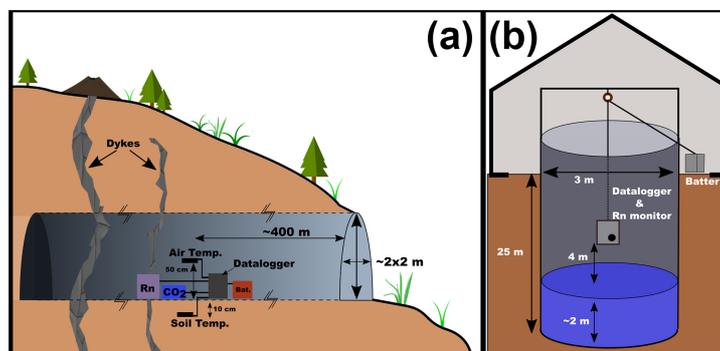


Fig. 3. Not to scale diagram of: a) continuous geochemical stations deployed inside galleries and b) continuous radon monitoring station at San Simón well (RSIM).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

202 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

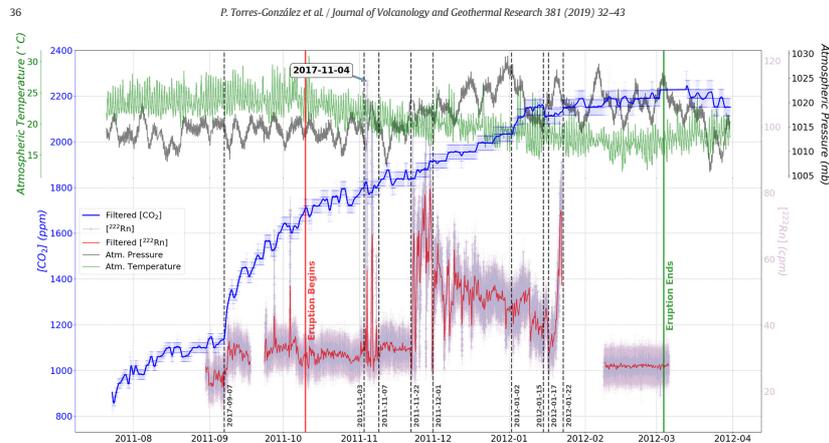


Fig. 4. Time evolution of gas concentrations at HTIN and RSIM. Carbon dioxide concentration in air at HTIN gallery (blue line) and radon concentration in air at RSIM well (violet line). Low pass filtered signals are plotted in dark blue for CO<sub>2</sub> and red for radon. Atmospheric pressure (gray line) recorded at AERO station alongside atmospheric temperature (green line) measured at BALN stations are also shown (Fig. 1). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

15 to the official end of the eruption, CO<sub>2</sub> remained practically constant around 2200 ± 34 ppm.

At RSIM, from the eruption onset until November 22 there was a stable background radon level with several clear peaks between November 3 and 7. The highest peak reached 110 ± 4 cpm on November 4, which means 233% above the background level at that time.

On November 22, the radon concentration at RSIM showed a drastic increase in the background level, reaching values around 90 ± 4 cpm. Until December 1, background radon concentration increased with some fluctuations. From that date, radon concentration showed a relatively stable background level, with no sharp increases but showing a slight decreasing trend.

Between January 17 and 22, the radon concentration at RSIM showed continuous growth, reaching 88 cpm. From January 22 to

February 8 there was a data gap due to a malfunction in the RSIM radon monitor. The entire system had to be replaced. The radon concentration remained at a background level similar to the values when the station was installed until the eruption officially ended.

## 6. Discussion

Once the variations in carbon dioxide and radon concentrations were identified and quantified, both time series were divided into five phases or stages between July 2011 and March 2012 (Table 2). This division was based on the main changes in geophysical parameters, ground deformation and accumulated seismic energy released (Fig. 5). Ground deformation measured at FRON and HI01 GNSS stations (Fig. 1), calculated using Bernese 5.2 with plate motion removed, and

Table 1  
 Descriptive statistics of the parameters recorded inside the galleries (HVER, HTIN, HTIG and HTAC) and the well (RSIM).

Station	Parameters	Sampling interval (min)	Installation and removal dates	Min	p25	Mean	Median	p75	Max	Number of measurements
HVER	Air Temperature (°C)	30	14-08-11	19.60 ± 0.05	21.09 ± 0.05	22.22 ± 0.05	22.33 ± 0.05	23.37 ± 0.05	24.48 ± 0.05	11,982
	Soil Temperature (°C)	-	-	21.16 ± 0.05	22.10 ± 0.05	23.09 ± 0.05	23.37 ± 0.05	23.98 ± 0.05	24.77 ± 0.05	-
	CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	-	-	955 ± 21	968 ± 21	1076 ± 22	1061 ± 21	1100 ± 22	1593 ± 28	-
	<sup>222</sup> Rn (cpm)	-	-	11 ± 4	14 ± 4	19 ± 4	15 ± 4	17 ± 4	56 ± 4	-
HTIN	Air Temperature (°C)	30	23-07-11	15.18 ± 0.05	15.21 ± 0.05	15.25 ± 0.05	15.24 ± 0.05	15.29 ± 0.05	17.46 ± 0.05	15,146
	Soil Temperature (°C)	-	-	14.7 ± 0.05	14.81 ± 0.05	14.86 ± 0.05	14.82 ± 0.05	14.84 ± 0.05	15.53 ± 0.05	-
	CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	-	-	825 ± 19	1099 ± 22	1527 ± 27	1619 ± 28	1681 ± 28	2305 ± 35	-
	<sup>222</sup> Rn (cpm)	-	-	12.1 ± 4	19 ± 4	82 ± 4	48 ± 4	147 ± 4	240 ± 4	-
HTIG	Air Temperature (°C)	30	24-07-11	13.72 ± 0.05	14.93 ± 0.05	15.02 ± 0.05	15.03 ± 0.05	15.11 ± 0.05	17.7 ± 0.05	13,695
	Soil Temperature (°C)	-	-	14.9 ± 0.05	15.53 ± 0.05	15.64 ± 0.05	15.67 ± 0.05	15.75 ± 0.05	17.11 ± 0.05	-
	<sup>222</sup> Rn (cpm)	-	-	4 ± 4	6 ± 4	8 ± 4	8 ± 4	10 ± 4	15 ± 4	-
HTAC	Air Temperature (°C)	30	28-11-11	16.81 ± 0.05	17.79 ± 0.05	18.13 ± 0.05	18.12 ± 0.05	18.48 ± 0.05	20.64 ± 0.05	4,414
	Soil Temperature (°C)	-	-	16.42 ± 0.05	17.35 ± 0.05	17.91 ± 0.05	17.78 ± 0.05	18.53 ± 0.05	20.35 ± 0.05	-
	<sup>222</sup> Rn (cpm)	-	-	13 ± 4	15 ± 4	17 ± 4	16 ± 4	17 ± 4	46 ± 4	-
RSIM	<sup>222</sup> Rn (cpm)	10	30-08-11	17 ± 4	29 ± 4	39 ± 4	32 ± 4	45 ± 4	114 ± 4	23,791

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilera UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

the accumulated seismic energy released, from the IGN seismic catalog, were included in the analysis. In Table 3 the five phases are defined, along with their primary characteristics and a brief description of the contemporaneous volcanic activity. In the same table, the last column links the phases identified in this work to those defined by González et al. (2013). For an easier follow-up of this section, a comparison with previous geochemical published data (Padrón et al., 2013; Melián et al., 2014) is provided in Fig. 6.

#### 6.1. Phase A: 18-07-2011–07-09-2011

Ground deformation showed a clear rate increase around July 18 2011. The IGN GPS network and FRON GNSS station started moving to the north, and both FRON and HI01 to the east as shown by López et al. (2012). The seismicity was mainly located on the northern side of the island, alternating between calm and high energy periods, as mentioned by López et al. (2012) and Ibáñez et al. (2012). Cerdeña et al. (2013) identified two clusters in the north with seismicity alternating between them. That could be interpreted as a sequential rupturing of faults around a swelling magma body. The seismic observations are compatible with a shallow magma intrusion (González et al., 2013; Martí et al., 2013), and degassing from such an intrusion could explain the increase in the CO<sub>2</sub> concentration in air at HTIN (Fig. 7). The sharp increase in CO<sub>2</sub> efflux at station HIE01 recorded by Pérez et al. (2012) from August 10 to 17, along with the CO<sub>2</sub> diffuse flux measurements carried out by López et al. (2012) and Melián et al. (2014) (Phase A<sub>M</sub> in Fig. 6b) suggest a widespread increase in CO<sub>2</sub> concentrations and fluxes during this phase.

The growth rate reduction in the CO<sub>2</sub> concentration from mid-August could be related to an overall decrease in magma degassing. Melián et al. (2014) also reported a decrease in the total CO<sub>2</sub> output rates from mid-August to September 9.

Table 3.- HTIN, RSIM stations: phase identification and summary of main characteristics. A brief description of seismic activity and ground deformation is included for each phase. The last column shows concurrent stages from González et al., 2013.

#### 6.2. Phase B: 07-09-2011–10-10-2011

At RSIM station, during the first days of its record, the radon concentration remained stable until September 7. On that date there was a sharp increase at both stations HTIN and RSIM (Figs. 7 and 8). These changes in two different gaseous species measured at two different locations (Fig. 1) suggest that on September 7 there was a substantial change in the volcanic process.

On September 4, the seismicity had started to migrate southward (Cerdeña et al., 2013). López et al. (2012) reported a ground deformation change during the first fortnight of September. Around September 9, the ground deformation accelerated (Fig. 7). The sharp increase in the CO<sub>2</sub> concentration at HTIN on September 7 corresponds in time to the increase in ground deformation. The entire IGN GNSS network and the FRON station (López et al., 2012) showed a clear northward movement (Fig. 7) and there was a change in the displacement rate in the east component between FRON and HI01 stations. This difference implies that a higher positive value means a shorter distance between these stations in the east direction, whereas the more negative the difference, the larger the distance between the stations. Station HI01 showed a higher eastward deformation rate than FRON. The decrease in the east component difference was clear (green line in Fig. 7). The difference in deformation rate between FRON and HI01 may have facilitated the opening of preexisting or new fractures or fissures located between them (Fig. 1) allowing easier gas escape. This sharp growth in CO<sub>2</sub> concentration inside the gallery matches the beginning of the phase B reported by Melián et al. (2014) (Phase B<sub>M</sub> in Fig. 6b), which started with an increase in the total diffuse CO<sub>2</sub> output rate.

Another possible consequence of the change in the deformation rate was the increase in radon background level at RSIM (Fig. 8). Increasing stress can release a greater amount of radon (Delfa et al., 2008; Tuccimei et al., 2010; Mollo et al., 2011; Scarlato et al., 2013; Nicolas et al., 2014).

From September 7 until the beginning of the eruption, ground deformation continued increasing (López et al., 2012; Prates et al., 2013). Seismicity migrated to the southern side of the island and, from September 18 on, the earthquake swarm depth increased to 14–16 km (López

Period	Phase	Start	End	[CO <sub>2</sub> ] at HTIN	[ <sup>222</sup> Rn] at RSIM	Seismicity	Deformation	González et al., 2013
Unrest	A	18-07-11	07-09-11	Increase, 8 ppm/d	Background level, 24 ± 4 cpm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Located on the northern side of the island alternating calm and high-energy periods</li> <li>Southward migration on September 4</li> </ul>	Clear northward movement	Phase July – August 2011
	B	07-09-11	10-10-11	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sharp increase on September 7</li> <li>Highest growth rate, 16 ppm/d</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Background level change on September 7</li> <li>50% increase on September 23–24</li> <li>115% increase on September 27</li> <li>114% increase on October 3</li> <li>Slight decrease in background level on October 6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increase in depth from September 18</li> <li>M4.4 event on October 8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acceleration in deformation rate</li> <li>Different rate in East component between FRON and HI01</li> <li>Deflation and inflation process between October 1 and 5</li> </ul>	Phase September – early October 2011
Eruption	C	10-10-11	22-11-11	Continuous increase, 4 ppm/d	Sharp increases up to 233%	<ul style="list-style-type: none"> <li>High energy seismicity on the northern side of the island</li> </ul>	No change	Phase late October – November 2011
	D	22-11-11	08-02-12	<ul style="list-style-type: none"> <li>Average increase rate of 4 ppm/d</li> <li>Acceleration in increasing rate on first fortnight of January, 9 ppm/d</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Drastic increase and high background levels from November 22 to first days of December</li> <li>Decreasing trend in background</li> <li>Continuous growth on January 17–22</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Low seismicity level</li> <li>Slight increase in the frequency of events</li> </ul>	Slight deflation on north component at FRON	Phase December 2011 – February 2012
	E	08-02-12	05-03-12	Concentration practically constant from end January	Return to phase A background levels	No change	No change	Phase March 2012

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA Fecha: 06/10/2020 12:15:48  
 Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 12:59:14  
 José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 13:23:57  
 Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA Fecha: 09/10/2020 05:03:40

**Table 2**  
 The phases defined and the changes in geochemical and geophysical parameters associated with each beginning.

Phase	Beginning date	Geochemical parameters	Geophysical parameters
A	18-07-11	HTIN record	–
B	07-09-11	Sharp increase in CO <sub>2</sub> and <sup>222</sup> Rn concentrations	Acceleration in ground deformation trend
C	10-10-11	Slowdown in CO <sub>2</sub> increasing trend and decrease in background <sup>222</sup> Rn level	Cease ground deformation and seismicity, and eruption onset
D	22-11-11	Abrupt increase in radon concentration	Slight deflation in ground deformation record
E	08-02-12	Cease of CO <sub>2</sub> increase at HTIN and return to initial background level at RSIM	No change

et al., 2012; Ibáñez et al., 2012). Some authors suggest fast upward magma migration at the center of the island during this period (González et al., 2013; Martí et al., 2013) and Meletidis et al. (2015) reported their highest estimate of accumulated magma volume. The CO<sub>2</sub> released from this shallow magma body, along with crustal fracturing, may explain why the CO<sub>2</sub> concentration at HTIN showed its highest growth rate in the entire study period during this phase. The increase at HTIN corresponds to those reported by Pérez et al. (2012) in CO<sub>2</sub> efflux during the same period. Also, there were increases in diffuse helium emission and in air-corrected helium ratio, (R/R<sub>0</sub>)<sub>corr</sub>, (Fig. 6a) (Padrón et al., 2013).

Between September 17 and 23 there was a data gap at RSIM due to power supply problems. Between September 23 and the eruption, the radon concentration in the well exhibited three sharp increases (Fig. 8, boxes 1, 2 and 3).

Due to the data gap, it is difficult to be sure whether the increase on September 24 (Fig. 8, box 1) was related to the change in the quantity of seismic energy released mid-September (López et al., 2012). Another possible explanation for this radon concentration increase could be a response to the rapid ground deformation measured during the data gap (Fig. 8).

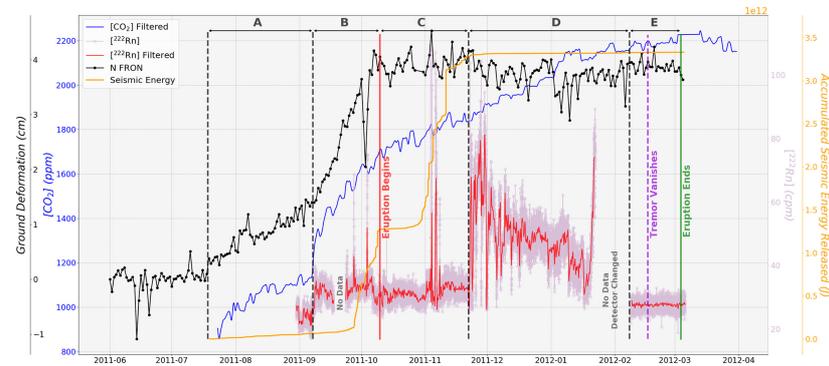
The sharp increase in radon concentration on September 27 (Fig. 8, box 2) matches the beginning of a drastic acceleration of the seismic energy release (López et al., 2012; Ibáñez et al., 2012). Therefore, taking into account the results reported by Delfa et al. (2008), Tuccimei et al. (2010), Mollo et al. (2011), Scarlato et al. (2013) and Nicolas et al. (2014), it is possible to infer that the increase measured on September 27 may have been due to rock microfracturing before the acceleration in seismicity. This microfracturing could have released a large amount of radon into the air inside the well.

The last radon concentration peak before the eruption onset took place on October 3 (Fig. 8, box 3). This sharp increase corresponds to an inflection point in the cumulative seismic energy released, when a slight deceleration was observed, and to the timing of a deflation-inflation process reported by López et al. (2012) and Prates et al. (2013). Again, the anomalous radon concentration at RSIM could be interpreted as an effect of crustal stress, increasing microfracturing (Delfa et al., 2008; Tuccimei et al., 2010; Mollo et al., 2011; Scarlato et al., 2013; Nicolas et al., 2014). In fact, this sharp increase in radon concentration in air matches the highest radon concentration values in soil reported by Padilla et al. (2013) on October 4.

On October 6, three days before the eruption, the base line in RSIM data showed a slight decrease in radon concentration coinciding with a clear plateauing of the deformation rate (Fig. 8, box 4). On the same dates, Meletidis et al. (2015) reported a southward movement of the deformation source. Hence, a reduction in the radon released from the surrounding crust, due to a relaxation in stress, could be an explanation for that slight drop. Padilla et al. (2013) also measured an abrupt decrease in radon concentration on the same dates. A relative maximum in diffuse helium emission and (R/R<sub>0</sub>)<sub>corr</sub> was measured two days before the onset of the submarine eruption (Fig. 6a). Padrón et al. (2013) interpreted these increases as a sudden release of volcanic gases related to the onset of the eruption.

### 6.3. Phase C: 10-10-2011–22-11-2011

Once the eruption began, a reduction in CO<sub>2</sub> release throughout the volcanic edifice was expected, due to overpressure reduction (Liuzzo



**Fig. 5.** Time evolution of gas concentrations at HTIN and RSIM. Filtered CO<sub>2</sub> concentration in air is shown at HTIN gallery (blue line), along with raw (violet line) and filtered (red line) radon concentration in air at RSIM well. The phases, A to E, and main volcanic events are highlighted. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

205 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------



Fig. 6. Comparison with previously published geochemical data: a) diffuse helium emission and air-corrected helium ratio,  $(R/R_a)_{cor}$ , from Padrón et al. (2013); b) diffuse  $CO_2$  emission and phases ( $A_M$ ,  $B_M$ ,  $C_M$ ,  $D_M$ ,  $E_M$ ,  $F_M$  and  $G_M$ ) from Melián et al. (2014); and c)  $CO_2$  and radon records at HTIN and RSIM, respectively.

et al. 2013). Consistent with this scenario, slight deflation was recorded after the eruption began (Carracedo et al., 2015; Meletidis et al., 2015). In addition, the difference between FRON and HI01 east components (Fig. 7) returned to pre-eruption values. The fractures or fissures that allowed the ascent of magmatic gases may have become partially

sealed. Pérez et al. (2012) also reported a decrease in the diffuse  $CO_2$  flux at their station HIE01 after the eruption began.

In the first days of November, there were several peaks in radon concentration at RSIM (Fig. 9). No significant ground deformation was measured on those dates, but the peaks match highly energetic seismic

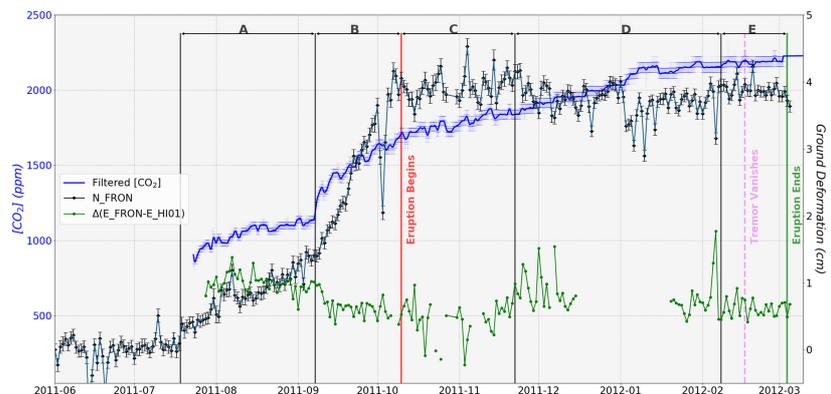


Fig. 7. Low pass filtered  $CO_2$  concentration in air at HTIN station (dark blue line) during the whole volcanic process. North component at FRON GNSS station (black line) and difference between east components at FRON and HI01 GNSS stations (green line) are also plotted. The different phases defined are shown with letters A to E. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

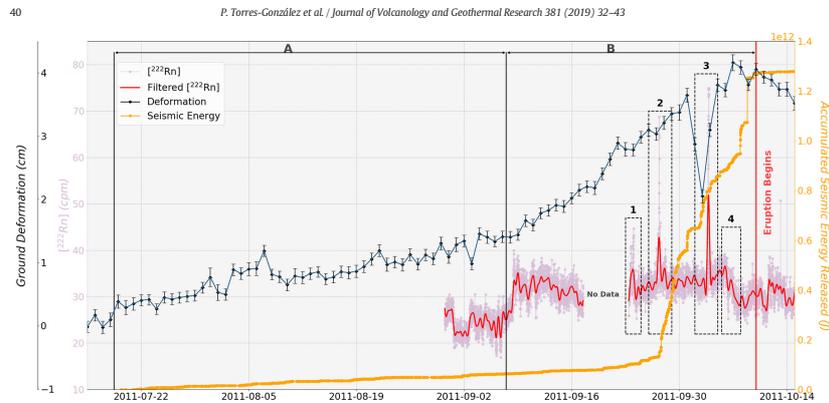


Fig. 8. Pre-eruption time evolution of radon concentration in air at RSIM station (violet line) alongside the north component at FRON GNS station (black line) and accumulated seismic energy release (orange line). The low pass filtered radon signal is shown (red line). The dashed-line boxes (1, 2, 3 and 4) highlight the main variations, while the phases identified are shown at the top with letters A and B. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

events. This new seismic activity was located on the northern side of the island at depths between 18 and 22 km (Ibáñez et al., 2012; Martí et al., 2013) (Fig. 2b). The largest earthquake, with  $M = 4.6$ , took place on November 8 and was clearly felt by the population. Tàrraga et al. (2014) reported an increment in tremor amplitude and episodes of maximum degassing, observed as giant bubbles on the sea surface above the eruption point. These sharp increases in the RSIM dataset could be linked to prior microfracturing, as in stage B (Fig. 8, box 2). However, the peaks in

radon concentration may also have originated from a deep gas source (Martí et al., 2013; Longpré et al., 2014) or reflect two other phenomena: radon released from new fractures or an increase in  $\text{CO}_2$  emission (Phase  $E_M$  in Fig. 6b) (Melián et al., 2014) acting as a radon carrier (Neri et al., 2016). Padrón et al. (2013) reported an increase in diffusive helium emission just before the high energetic events in November and a decrease in  $(R/R_0)_{\text{cor}}$  linked to the release of crustal radiogenic helium by fracturation (Fig. 6a).

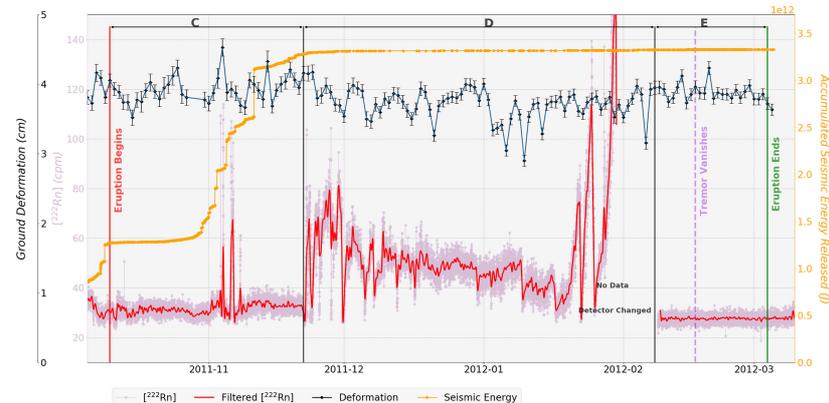


Fig. 9. Time evolution during the eruption period of radon concentration in air at RSIM (violet line) alongside the north component at FRON GNS station (black line) and seismic energy released (orange line). Low pass filter of the radon concentration is also shown (red line). Different phases identified are shown with letters C, D and E. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6.4. Phase D: 22-11-2011–08-02-2012

At the beginning of this stage, radon concentration at RSIM showed an abrupt increase (Fig. 9). Since no seismicity nor significant ground deformation were measured, this increase may reflect degassing of a fresh batch of magma (Longpré et al., 2014 and Martí et al., 2013). Melián et al. (2014) (Fig. 6b) reported the highest values of total diffuse CO<sub>2</sub> on those days. Therefore, a sharply increased radon concentration at RSIM could be related to a deep contribution, where carbon dioxide acted as a carrier (Neri et al., 2016). Padilla et al. (2013) points to the same origin for the increase in the <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn ratio.

Radon concentration on December 1 showed a slight decreasing trend. Seismicity and ground deformation remained minimal. Tárrega et al. (2014) reported a decrease in the average tremor amplitude beginning on November 20. This was compatible with a drop in the <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn ratio (Padilla et al., 2013) and in the total CO<sub>2</sub> emission (Phase F<sub>4</sub> in Fig. 6b) (Melián et al., 2014).

Until the first days of January 2012, CO<sub>2</sub> at HTIN continued its constant increase rate (Fig. 7). At the same time, the radon concentration decrease slowed down at RSIM. Although the seismicity and ground deformation remained essentially unchanged, Tárrega et al. (2014), reported a slight increase in the tremor amplitude, reaching a maximum value on January 20. They attributed this increase to changes in magma viscosity, which could have been caused by small inputs of fresh basic magmas, as Martí et al. (2013) and González et al. (2013) suggested, and would be expected to cause a small increase in gaseous emissions. This explanation is coherent with the data set from HTIN and RSIM, the increase in radon and <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn ratio measured by Padilla et al. (2013), and the CO<sub>2</sub> efflux data reported by Melián et al. (2014) (Phase G<sub>M</sub> in Fig. 6b).

Before the radon dataset gap in the second fortnight of January, there was a clear increase in radon concentration at RSIM (Fig. 9). During that time span, and until it eventually ceased, the tremor was characterized by pulsations and oscillations that Tárrega et al. (2014) associated with a discontinuous and highly degassed magma supply. Padilla et al. (2013) reported an increase in soil radon concentration, and renewed growth in the <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn ratio at that time. Melián et al. (2014) (Phase G<sub>M</sub> in Fig. 6b) reported a slight increase in total diffuse CO<sub>2</sub> efflux on January 15. Since no ground deformation was measured or seismic energy released, a deep gas origin for this increase at RSIM is the most likely explanation.

6.5. Phase E: 08-02-2012–05-03-2012

Radon concentration returned to a level similar to stage A after the radon monitor at RSIM was replaced on February 2012. Based on Padilla et al. (2013), the return to background levels was likely real, and not due to equipment issues.

Carbon dioxide concentration at HTIN remained practically constant since the first days of February, probably due to a steady CO<sub>2</sub> emission as Melián et al. (2014) reported (Phase G<sub>M</sub> in Fig. 6b).

7. Conclusions

The IGN geochemical network was deployed after seismicity and ground deformation began. Of the five monitoring stations, only one gallery and the well showed variations in CO<sub>2</sub> and radon concentrations respectively. These sites were located on the northern side of the island, close to the scar of the El Golfo gravitational collapse. During the unrest period (Phases A and B in Fig. 7 and Table 3), the CO<sub>2</sub> concentration in air showed a constant increase at HTIN station (8 ppm/d), likely due to magma degassing. The increase seemed to be strongly controlled by the ground deformation trend. This was evident on September 72,011 (abrupt increase in one day, a 100 ± 12 ppm leap), when the ground deformation trend reached an inflection point and accelerated. From that point until the eruption onset, the CO<sub>2</sub> concentration at HTIN exhibited

its highest observed growth rate, 16 ppm/d. On the same date, there was increased radon concentration in air at RSIM, an increase to 50% over background level (Phase B, Fig. 8). This elevated radon level was maintained until five days before the eruption onset. The shift in radon concentration corresponds to the highest ground deformation rate observed before the eruption and therefore to the stress suffered by the crust. During this pre-eruption stage, there were also discrete sharp increases in the radon concentration that correspond to rapid changes in ground deformation and seismic energy released. The highest reached 69 ± 4 cpm, an increase of 115% above background level. During the eruption period, the CO<sub>2</sub> concentration at HTIN continued rising (Phases C and D, Fig. 7) at a lower rate (4 ppm/d), perhaps due to diminished diffuse degassing and partial sealing of fractures/fissures opened during the unrest period. However, radon concentration in air at RSIM showed two different behaviors. First, a relatively stable background with several sharp increases (the highest one reached 110 ± 4 cpm, a 233% increase above background level) corresponds to large earthquakes in November 2011 and bubbling on the sea surface over the eruption location (Phase C in Fig. 9). These radon peaks may be linked to increased degassing and/or microfracturing. Second, on November 22, there was a sharp increase in the radon base level (Phase D, Fig. 9), after which the radon concentration decreased until the end of January (Fig. 9), probably linked with the degassing process.

Interpreting geochemical signals is always a complex task, due in part to potential influences from external parameters. In the particular case of the Canary Islands, it is also complicated by the lack of geochemical data from previous eruptions. Analysis of geochemical data alongside seismological and geodetic data can contribute to a better understanding of volcanic activity. We show that galleries and wells can provide suitable sites to monitor volcanic gaseous emissions. Data collected at these locations will complement and improve the volcanic monitoring program in the Canary Islands.

Declarations of interest

None.

Acknowledgments

The authors wish to thank the National Seismic Network (IGN) and the volcanic monitoring team (IGN) for their excellent work. The authors also thank Walter D'Alessandro and Marco Liuzzo from INGV-Palermo for their suggestions and corrections to improve this article. Finally, thanks to Steven Ingebritsen from USGS for his help in the text revision improving the English. The Instituto Geográfico Nacional of the Spanish Ministerio de Fomento funded this work.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.018>.

References

- Agencia Estatal de Meteorología - AEMET, 2018. Gobierno de España [WWW Document]. URL <http://www.aemet.es/portada>, Accessed date: 31 December 2018.
- Aiuppa, A., Burton, M., Caltabiano, T., Giudice, G., Guerrieri, S., Liuzzo, M., Murè, F., Salerno, C., 2010. Unusually large magmatic CO<sub>2</sub> gas emissions prior to a basaltic paroxysm. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL043837>.
- Alparone, S., Behncke, B., Giammanco, S., Neri, M., Privitera, E., 2005. Paroxysmal summit activity at Mt. Etna (Italy) monitored through continuous soil radon measurements. *Geophys. Res. Lett.* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL023352>.
- Arpa, M.C., Hernández, P.A., Padrón, E., Reniva, P., Padilla, G.D., Bariso, E., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Calvo, D., Pérez, N.M., Solidum, R.U., 2013. Geochemical evidence of magma intrusion inferred from diffuse CO<sub>2</sub> emissions and fumarole plume chemistry: the 2010–2011 volcanic unrest at Taal Volcano, Philippines. *Bull. Volcanol.* 75, 747. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0747-9>.
- Aware Electronics Corp. RM specs, 2018. WWW Document. URL <https://www.aw-el.com/specs.htm>, Accessed date: 9 September 2018.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

208 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Becerril, I., Galve, J.P., Morales, J.M., Romero, C., Sánchez, M., Martí, J., Galindo, I., 2016. Volcano-structure of El Hierro (Canary Islands). *J. Maps* 12, 43–52. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1157767>.

Brusca, L., Aluppa, A., D'Alessandro, W., Parelo, F., Allard, P., Michel, A., 2001. Geochemical mapping of magmatic gas-water-rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 108, 199–218. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00286-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00286-8).

Capasso, C., D'Alessandro, W., Favara, R., Inguaggiato, S., Parelo, F., 2001. Interaction between the deep fluids and the shallow groundwaters on Vulcano Island (Italy). 108. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00285-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00285-7).

Caracausi, A., Ditta, M., Italiano, F., Longo, M., Nucchi, P.M., Paonita, A., Rizzo, A., 2005. Changes in fluid geochemistry and physico-chemical conditions of geothermal systems caused by magmatic input: the recent abrupt outgassing off the island of Panarea (Aeolian Islands, Italy). *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 3045–3059. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.02.011>.

Carapezza, M.L., Ricci, T., Ranaldi, M., Turchini, L., 2009. Active degassing structures of Stromboli and variations in diffuse CO<sub>2</sub> output related to the volcanic activity. 2007 Erupt. Stromboli 182, 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.volvolges.2008.08.006>.

Carraçedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J., Torrado, F.J.P., 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canary Islands. *Estud. Geològics* 57, 175–273. <https://doi.org/10.3989/egest.01575-6134>.

Carraçedo, J.C., Troll, V.R., Zacek, K., Rodríguez-González, A., Soler, V., Deegan, F.M., 2015. The 2011–2012 submarine eruption off El Hierro, Canary Islands: New lessons in oceanic island growth and volcanic crisis management. *Earth-Sci. Rev.* 150, 168–200. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.007>.

Cerdeña, I.D., del Fresno, C., Moreno, A.G., 2013. Seismicity patterns prior to the 2011 El Hierro eruption. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, 567–575. <https://doi.org/10.1785/0120130200>.

Chioldini, G., Frondini, F., Raco, B., 1996. Diffuse emission of CO<sub>2</sub> from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). *Bull. Volcanol.* 58, 41–50. <https://doi.org/10.1007/s004450050124>.

Chioldini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., Marini, L., 1998. Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.* 13, 543–552. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0).

Chioldini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., Ventura, G., 2001. CO<sub>2</sub> degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 106, 16213–16221. <https://doi.org/10.1029/2001JB000246>.

CIATE, C.I. de A. de T., 2018. Consejo Insular de Aguas de Tenerife [WWW Document]. URL. <http://www.agaestenerife.org/>. Accessed date: 18 July 2018.

Cigolini, C., Cervino, G., Bonetti, R., Conte, F., Laiolo, M., Coppola, D., Manzoni, A., 2005. Tracking precursors and degassing by radon monitoring during major eruptions at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *J. Geophys. Res. Lett.* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL022696>.

Cigolini, C., Laiolo, M., Ubivieri, G., Coppola, D., Rippe, M., 2013. Radon mapping, automatic measurements and extremely high <sup>222</sup>Rn emissions during the 2002–2007 eruptive scenarios at Stromboli volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 264, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.volvolges.2013.07.011>.

Cox, M.E., Cuff, K.E., Thomas, D.M., 1980. Variations of ground radon concentrations with activity of Kilauea Volcano, Hawaii. *Nature* 288, 74. <https://doi.org/10.1038/288074a0>.

del Fresno, C., Domínguez-Cerdeña, I., Cesca, S., Buforn, E., 2014. The 8 October 2011 earthquake at El Hierro (Mw 4.0): focal mechanisms of the mainshock and its foreshocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105, 330–340. <https://doi.org/10.1785/0120140151>.

Delfa, S.L., Agostino, L., Morelli, D., Patané, C., 2008. Soil radon concentration and effective stress variation at Mt. Etna (Sicily) in the period January 2003–April 2005. *Radiat. Meas.* 43, 1299–1304. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.02.004>.

Domínguez-Cerdeña, I., García-Cañada, L., Benito-Saz, M.A., Fresno, C., del, Lamolda, H., Pablo, J.P., de, Sanz, C.S., 2018. On the relation between ground surface deformation and seismicity during the 2012–2014 successive magmatic intrusions at El Hierro Island. *Tectonophysics* 744, 422–437. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.019>.

Eff-Darwich, A., Martín-Luis, C., Quesada, M., de la Nuez, J., Coello, J., 2002. Variations on the concentration of <sup>222</sup>Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.* 29, 26–1–26–4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015387>.

Eff-Darwich, A., Vinas, R., Soler, V., Nuez, J., de la Quesada, M.L., 2008. Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring. *Radiat. Meas.* 43, 1429–1436. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.05.006>.

Falsaperla, S., Neri, M., Di Grazia, C., Langer, H., Spampinato, S., 2017. What happens to in-situ Radon activity during a long-lasting eruption? Insights from Etna by multidisciplinary data analysis. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 18, 2162–2176. <https://doi.org/10.1002/2017GC006825>.

Cee, M.J.R., Watts, A.B., Masson, D.G., Mitchell, N.C., 2001. Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands. *Mar. Geol.* 177, 271–293. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00153-0).

Gerlach, T.M., Graeber, E.J., 1985. Volatile budget of Kilauea volcano. *Nature* 313, 273. <https://doi.org/10.1038/313273a0>.

Gerlach, T.M., Nordlie, B.E., 1975. The C-O-H-S gaseous system: Part I. Composition limits and trends in basaltic cases. *Am. J. Sci.* 275, 353–376. <https://doi.org/10.2475/ajs.275.4.353>.

Giammanco, S., Sims, K.W.W., Neri, M., 2007. Measurements of <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Rn and CO<sub>2</sub> emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 8. <https://doi.org/10.1029/2007GC001644>.

Girault, F., Schubnel, A., Pili, É., 2017. Transient radon signals driven by fluid pressure pulse, micro-crack closure, and failure during granite deformation experiments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 474, 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.013>.

Gobierno de Canarias, 2012. El Comité Científico del PEVOLCA da Por Finalizada la erupción Submarina Que se inició en Octubre en El Hierro [WWW Document]. Gob. Canar URL. <http://www.gobiernodecanarias.org/noticias/29660/comite-cientifico-pevolca-da-finalizada-erupcion-submarina-inicio-octubre-hierro>. Accessed date: 29 April 2018.

González, P.J., Samsonov, S.V., Pepe, S., Tiampo, K.F., Tizzani, P., Casu, F., Fernández, J., Camacho, A.G., Sansosti, E., 2013. Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: Implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 118, 4361–4377. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50285>.

Guillou, H., Carraçedo, J.C., Torrado, F.P., Badiola, E.R., 1996. K-Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast grown oceanic island: El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 73, 141–155. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(96\)00021-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(96)00021-2).

Hernández, P., Pérez, N., Lorenzo Salazar, J., Reimer, M., Notsu, K., Wakita, H., 2004. Radon and helium in soil gases at Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. 131. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00316-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00316-0).

Ibáñez, J.M., De Angelis, S., Díaz-Moreno, A., Hernández, P., Alguacil, G., Posadas, A., Pérez, N., 2012. Insights into the 2011–2012 submarine eruption off the coast of El Hierro (Canary Islands, Spain) from statistical analyses of earthquake activity. *Geophys. J. Int.* 191, 659–670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05626.x>.

Kobayashi, Y., Yasuoka, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Sanada, T., Muto, J., Suzuki, T., Homma, Y., Ihara, H., Kubota, K., Mukai, T., 2015. Annual variation in the atmospheric radon concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.* 146, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.envrad.2015.05.009>.

Laiolo, M., Ranaldi, M., Turchini, L., Carapezza, M.L., Coppola, D., Ricci, T., Cigolini, C., 2016. The effects of environmental parameters on diffuse degassing at Stromboli volcano: Insights from joint monitoring of soil CO<sub>2</sub> flux and radon activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 315, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.volvolges.2016.02.004>.

Lewicki, J.L., Bergfeld, D., Cardellini, C., Chioldini, G., Granieri, D., Varley, W., Werner, C.A., 2005. Comparative soil CO<sub>2</sub> flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua. *Bull. Volcanol.* 68, 76–90. <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0423-9>.

Liuzzo, M., Garreri, S., Giudice, G., Ciuffrida, C., 2013. Ten years of soil CO<sub>2</sub> continuous monitoring on Mt. Etna: Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 14, 2886–2899. <https://doi.org/10.1002/ggge.20196>.

Longpré, M.-A., Klügel, A., Diehl, A., Stix, J., 2014. Mixing in mantle magma reservoirs prior to and during the 2011–2012 eruption at El Hierro, Canary Islands. *Geology* 42, 315–318. <https://doi.org/10.1130/G35165.1>.

López, C., Blanco, M.J., Abella, R., Brenes, B., Cabrera Rodríguez, V.M., Casas, B., Domínguez-Cerdeña, I., Felipeto, A., de Villalta, M.F., del Fresno, C., García, O., García-Arias, M.J., García-Cañada, L., Gómez Moreno, A., González-Alonso, E., Guzmán Pérez, J., Iribarren, L., López-Díaz, R., Luengo-Oroz, N., Meletlidis, S., Moreno, M., Mouré, D., de Pablo, J.P., Rodero, C., Romero, E., Sainz-Maza, S., Sentre Domingo, M.A., Torres, P.A., Trigo, P., Villasante-Marcos, V., 2012. Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL051846> n/a-n/a.

Marrero, R., López, D.L., Hernández, P.A., Pérez, N.M., 2008. Carbon Dioxide Discharged through the Las Cañadas Aquifer, Tenerife, Canary Islands. *Terr. Fluids Earthq. Volcanoes Hiroshi Wakita III*, 147–172. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8738-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8738-9_10).

Martí, J., Pinel, V., López, C., Geyer, A., Abella, R., Tárrega, M., Blanco, M.J., Castro, A., Rodríguez, C., 2013. Causes and mechanisms of the 2011–2012 El Hierro (Canary Islands) submarine eruption. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 118, 823–839. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50087>.

Martín-Luis, C., Quesada, M., Eff-Darwich, A., De la Nuez, J., Coello, J., Ahijado, A., Casillas, R., Soler, V., 2002. A new strategy to measure radon in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands). *Environ. Geol.* 43, 72–78. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0606-z>.

Martín-Luis, M.C., Steinitz, G., Soler, V., Quesada, M.L., Casillas, R., 2015. <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub> at Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 224, 641–657. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02397-7>.

Masson, D.G., 1996. Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 ka ago and the history of landslides in the Canary Islands. *Geology* 24, 231–234. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0231:COTVI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0231:COTVI>2.3.CO;2).

Meletlidis, S., Di Roberto, A., Domínguez-Cerdeña, I., Pompilio, M., García-Cañada, L., Bertagnini, A., Benito-Saz, M.-A., Del Carlo, P., Sainz-Maza-Aparicio, S., 2015. New insight into the 2011–2012 unrest and eruption of El Hierro Island (Canary Islands) based on integrated geophysical, geotectonic and petrological data. *Ann. Geophys.* 58 (0546). <https://doi.org/10.4401/ag-6754>.

Melán, G., Hernández, P.A., Padrón, E., Pérez, N.M., Barrancos, J., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Calvo, D., Nolasco, D., 2014. Spatial and temporal variations of diffuse CO<sub>2</sub> degassing at El Hierro volcanic system: relation to the 2011–2012 submarine eruption. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 6976–6991. <https://doi.org/10.1002/2014JB011013>.

Mollo, S., Tucímpei, P., Heap, M.J., Vinciguerra, S., Seligo, M., Castelluccio, M., Scarlató, P., Dingwell, D.B., 2011. Increase in radon emission due to rock failure: an experimental study. *Geophys. Res. Lett.* 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL047962>.

Moure-García, A.D., 2017. Array sísmico inalámbrico Y de parámetros Ambientales Para la caracterización de Precusores de Actividad volcánica. (PhD Thesis). Universitat Politècnica de Catalunya.

Münz, S., Walter, T.R., Klügel, A., 2006. Gravitational spreading controls rift zones and flank instability on El Hierro, Canary Islands. *Geol. Mag.* 143, 257–268. <https://doi.org/10.1017/S0016758006002019>.

Nazaroff, W.W., 1992. Radon transport from soil to air. *Rev. Geophys.* 30, 137–160. <https://doi.org/10.1029/92RG00055>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmEg
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilera  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

- Neri, M., Ferrara, E., Giammanco, S., Currenti, G., Cirrincione, R., Patané, G., Zanon, V., 2016. Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Sci. Rep.* 6, 24581.
- Nicolas, A., Girault, F., Schubnel, A., Pili, É., Passet, G., Fortin, J., Deldicque, D., 2014. Radon emanation from brittle fracturing in granites under upper crustal conditions. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5436–5443. <https://doi.org/10.1002/2014GL061095>.
- Notsu, K., Suggawa, K., Hosoe, M., Iemura, A., Shimokae, Y., Tsunomori, F., Sumino, H., Yamamoto, J., Mori, T., Hernández, P.A., 2005. Diffuse CO<sub>2</sub> efflux from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeeres.2004.08.003>.
- Notsu, K., Mori, T., Vait, S.C.D., Kagi, H., Ito, T., 2006. Monitoring quiescent volcanoes by diffuse CO<sub>2</sub> degassing: case study of Mt. Fuji, Japan. *Pure Appl. Geophys.* 163, 825–835. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0051-0>.
- Padilla, G.D., Hernández, P.A., Padrón, E., Barrancos, J., Pérez, N.M., Melián, G., Nolasco, D., Dionis, S., Rodríguez, F., Calvo, D., Hernández, I., 2013. Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): the 2011–2012 submarine eruption. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 14, 432–447. <https://doi.org/10.1029/2012GC004375>.
- Padrón, E., Melián, G., Marrero, R., Nolasco, D., Barrancos, J., Padilla, G., Hernández, P.A., Pérez, N.M., 2008. Changes in the diffuse CO<sub>2</sub> emission and relation to seismic activity in and around El Hierro, Canary Islands. *Pure Appl. Geophys.* 165, 95–114. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0281-9>.
- Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D., Nagao, K., 2013. Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. *Geology* 41, 539–542. <https://doi.org/10.1130/G34027.1>.
- Padrón, E., Pérez, N.M., Rodríguez, F., Melián, G., Hernández, P.A., Sumino, H., Padilla, G., Barrancos, J., Dionis, S., Notsu, K., Calvo, D., 2015. Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Bull. Volcanol.* 77, 28. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0914-2>.
- Pérez, N.M., Hernández, P.A., Padrón, E., Melián, G., Marrero, R., Padilla, G., Barrancos, J., Nolasco, D., 2007. Precursory subsurface <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Rn degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. *Pure Appl. Geophys.* 164, 2431–2448. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0280-x>.
- Pérez, N.M., Padilla, G.D., Padrón, E., Hernández, P.A., Melián, G.V., Barrancos, J., Dionis, S., Nolasco, D., Rodríguez, F., Calvo, D., Hernández, I., 2012. Precursory diffuse CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S emission signatures of the 2011–2012 El Hierro submarine eruption, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL052410>.
- Prates, G., García, A., Fernández-Ros, A., Marrero, J.M., Ortiz, R., Berrocoso, M., 2013. Enhancement of sub-daily positioning solutions for surface deformation surveillance at El Hierro volcano (Canary Islands, Spain). *Bull. Volcanol.* 75, 724. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0724-3>.
- Richon, P., Sabroux, J.-C., Halwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J., Punongbayan, R., 2003. Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: a likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophys. Res. Lett.* 30. <https://doi.org/10.1029/2003GL018902>.
- Rivera, J., Lastras, G., Canals, M., Acosta, J., Arrese, B., Hemida, N., Micalef, A., Tello, O., Amblas, D., 2013. Construction of an oceanic island: insights from the El Hierro (Canary Islands) 2011–2012 submarine volcanic eruption. *Geology* 41, 355–358. <https://doi.org/10.1130/G33863.1>.
- Santana-Casiano, J.M., Fraile-Nuez, E., González-Dávila, M., Baker, E.T., Resing, J.A., Walker, S.L., 2016. Significant discharge of CO<sub>2</sub> from hydrothermalism associated with the submarine volcano of El Hierro Island. *Sci. Rep.* 6, 25686.
- Scarlato, P., Tuccimei, P., Mollo, S., Soligo, M., Castelluccio, M., 2013. Contrasting radon background levels in volcanic settings: clues from <sup>222</sup>Rn activity concentrations measured during long-term deformation experiments. *Bull. Volcanol.* 75, 751. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0751-4>.
- SenseAir, 2018. aSENSE [WWW Document]. SenseAir URL. <https://senseair.com/products/asense/asense-display/>. Accessed date: 1 September 2018.
- Silva, C., Ferreira, T., Viveiros, F., Allard, P., 2015. Soil radon (<sup>222</sup>Rn) monitoring at Furnas Volcano (São Miguel, Azores): applications and challenges. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 224, 659–686. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02398-6>.
- Soler, V., Castro-Almázan, J.A., Viñas, R.T., Eff-Darwich, A., Sánchez-Moral, S., Hillaire-Marcel, C., Farrujia, I., Coello, J., De La Nuez, J., Martín, M.C., Quesada, M.L., Santana, E., 2004. High CO<sub>2</sub> levels in boreholes at El Teide Volcano Complex (Tenerife, Canary Islands): implications for volcanic activity monitoring. In: Fernández, J. (Ed.), *Geotectonic and Geophysical Effects Associated with Seismic and Volcanic Hazards*. Birkhäuser Basel, Basel, pp. 1519–1532. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7897-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7897-5_14).
- Steinitz, G., Begin, Z.B., Gazit-Yaari, N., 2003. Statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea rift valley. *Geology* 31, 505–508. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0505:SSRBBF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0505:SSRBBF>2.0.CO;2).
- Tárraga, M., Martí, J., Abella, R., Carniel, R., López, C., 2014. Volcanic tremors: good indicators of change in plumbing systems during volcanic eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 273, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeeres.2014.01.003>.
- Troll, V.R., Carracedo, J.C., 2016a. Chapter 1 - the Canary Islands: An Introduction. *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier, pp. 1–41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809663-5.00001-3>.
- Troll, V.R., Carracedo, J.C., 2016b. Chapter 2 - the Geology of El Hierro, in: *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier, pp. 45–99. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809663-5.00002-5>.
- Tuccimei, P., Mollo, S., Vinciguerra, S., Castelluccio, M., Soligo, M., 2010. Radon and thoron emission from lithophysae-rich tuff under increasing deformation: an experimental study. *Geophys. Res. Lett.* 37. <https://doi.org/10.1029/2009GL042134>.
- Villasante-Marcos, V., Pavón-Carrasco, F.J., 2014. Palaeomagnetic constraints on the age of Lomo Negro volcanic eruption (El Hierro, Canary Islands). *Geophys. J. Int.* 199, 1497–1514. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu346>.
- Viñas, R., Eff-Darwich, A., Soler, V., Castro-Almázan, J.A., Martín-Luis, M.C., Coello, J., Quesada, M.L., de la Nuez, J., 2004. Comparative analysis of continuous radon sensors in underground environments. *Environ. Geol.* 46, 1108–1117. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1106-0>.
- Viveiros, F., Ferreira, T., Silva, C., Gaspar, J.L., 2009. Meteorological factors controlling soil gases and indoor CO<sub>2</sub> concentration: a permanent risk in degassing areas. *Sci. Total Environ.* 407, 1362–1372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.008>.
- Zafir, H., Barbosa, S., Malik, U., 2012. Differentiation between the effect of temperature and pressure on radon within the subsurface geological media. *Radiat. Meas.* 49, 39–56. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.11.019>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

210 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilera  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

## Apéndice C

# Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands

*Revista:*

Journal of Volcanology and Geothermal Research

*Autores:*

Pedro Torres González<sup>1</sup>

Natividad Luengo-Oroz<sup>1</sup>

Héctor Lamolda<sup>2</sup>

Walter D'Álessandro<sup>3</sup>

Helena Albert<sup>2</sup>

Ilazkiñe Iribarren<sup>1</sup>

David Moure García<sup>1</sup>

Vicente Soler<sup>4</sup>

1) Centro Geofísico de Canarias, IGN

2) Observatorio Geofísico Central, IGN

3) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV

4) Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106757>

211

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

211 / 229

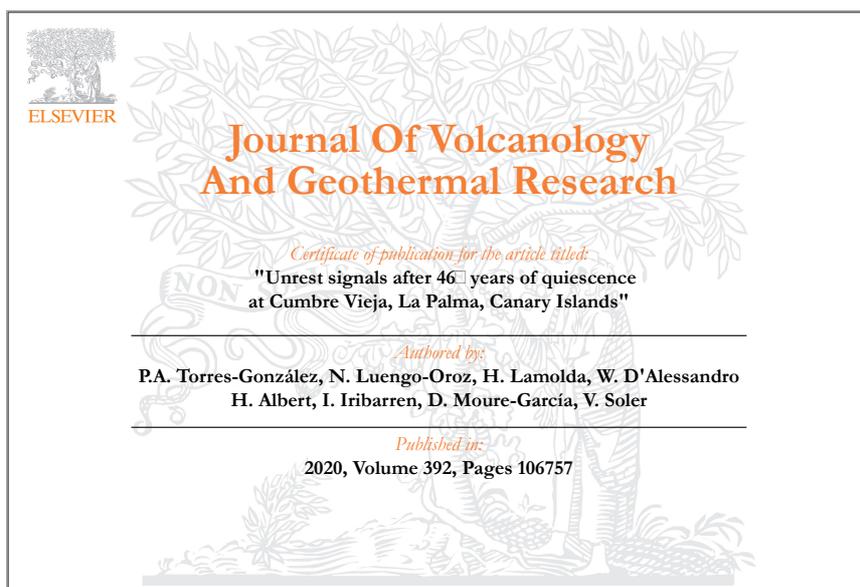
Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

211 / 229



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

212 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373      Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Journal of Volcanology and Geothermal Research 392 (2020) 106757



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Volcanology and Geothermal Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jvolgeores](http://www.elsevier.com/locate/jvolgeores)



## Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands

P.A. Torres-González<sup>a,\*</sup>, N. Luengo-Oroz<sup>a</sup>, H. Lamolda<sup>b</sup>, W. D'Alessandro<sup>c</sup>, H. Albert<sup>b</sup>, I. Iribarren<sup>a</sup>, D. Moure-García<sup>a</sup>, V. Soler<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Instituto Geográfico Nacional, Centro Geofísico de Canarias, C/ La Marina 20, 2ª, 38001 Santa Cruz de Tenerife, Spain

<sup>b</sup> Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico Central, C/ Alfonso XII, 3, 28014 Madrid, Spain

<sup>c</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, sezione di Palermo, via Ugo la Malfa, 153, 90146 Palermo, Italy

<sup>d</sup> Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Estación Volcanológica de Canarias, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, 3, 38203 San Cristóbal de La Laguna, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 July 2019

Received in revised form 15 December 2019

Accepted 16 December 2019

Available online 30 December 2019

#### Keywords:

Monogenetic volcanic field

Magmatic intrusion

Seismic swarms

Helium and carbon isotopes

Radon and thoron concentrations in soil

La Palma

### ABSTRACT

Monogenetic eruptions are the most common volcanic activity in the world. However, unrest monitoring data are scarce due to the long intervening quiescence periods. This study analyzes unrest signals recorded in one of the largest monogenetic fields in the Canary Islands, Cumbre Vieja (La Palma). Two seismic swarms were registered in October 2017 and February 2018 with b-values of  $1.6 \pm 0.1$  and  $2.3 \pm 0.2$  respectively suggesting an intense magmatic fluids contribution, gas and/or magma. Both swarms were linked to changes in gas emissions. Increases in hydrogen concentration, and ( $R/R_0$ ), up to  $7.52 \pm 0.05$ , were recorded before the first swarm, at the sampling point closest to where seismicity was located, indicating a deep gas input. After the second swarm, increases in ( $R/R_0$ ), and thoron soil concentration were recorded at two locations. This dataset is compatible with a stalled magmatic intrusion at ca. 25 km depth, with an estimated volume between  $5.5 \cdot 10^{-4}$  km<sup>3</sup> and  $3 \cdot 10^{-2}$  km<sup>3</sup>.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Volcanic eruptions are usually preceded by increases in background seismicity and gaseous emissions (Aiuppa et al., 2007; López et al., 2012; White and McCausland, 2016; Lee et al., 2018). Ground deformation is also typically recorded (López et al., 2012; Lamolda et al., 2017; Stephens et al., 2017). Changes in gravity (Sainz-Maza Aparicio et al., 2014), geomagnetic (Kanda et al., 2010) and geoelectric fields (Zlotnicki, 2015; Wawrzyniak et al., 2017) are also measured. These variations are cataloged as precursory signals of eruptions, allowing volcanologists to forecast where and when an eruption could occur (Boué et al., 2015; National Academies of Sciences and Medicine, 2017). However, in some cases the precursory activity ends in a failed eruption (Moran et al., 2011; Falsaperla et al., 2014; Rizzo et al., 2015). This situation is particularly common in monogenetic fields (Cruz-Reyna and Yokoyama, 2011; Albert et al., 2016).

Monogenetic volcanic fields are wide areas where volcanism has taken place over millions of years as single eruptive episodes (Phillipson et al., 2013). This kind of volcanism is the most widespread

type of volcanic activity in the world, mainly expressed as mafic eruptions with a low explosive eruption index (Phillipson et al., 2013; Marti et al., 2016). Due to its long quiescence periods and unexpected eruption locations, there is a huge lack of monitoring data (Albert et al., 2016).

Monogenetic volcanoes have been traditionally related to single batches of magma (Hasenaka and Carmichael, 1985; Pérez-López et al., 2011) but recent studies show that a single eruption may display geochemical changes that require multiple magma batches (Needham et al., 2011; Albert et al., 2015). Failed eruptions (stalled magma batches) in monogenetic fields may constitute the opening path for future eruptions. Therefore, volcanic hazard assessment will be improved by combining the geochemical, geophysical and petrological data to understand the dynamics of the plumbing system (Klügel et al., 1997, 2000, 2005; López et al., 2012; Marti et al., 2016).

In this study, the unrest signals recorded at Cumbre Vieja are reported and analyzed. Two seismic swarms were detected in October 2017 and February 2018. Both were preceded and accompanied by changes in helium and carbon dioxide emissions, but no ground deformation was measured. After the second swarm, increases in thoron concentration in soil were recorded at two sites located along the Cumbre Vieja rift. The most plausible interpretation of these results is a magmatic intrusion from depth and/or an active reservoir beneath that rift.

\* Corresponding author.  
E-mail address: [patorres@fomento.es](mailto:patorres@fomento.es) (P.A. Torres-González).

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106757>  
0377-0273/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

213 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

2. Geological context

The Canary Islands are a 500 km east-west chain of seven major volcanic islands and a number of smaller islets. Subaerial volcanic activity in the archipelago began around 20 Ma ago building the eastern islands, Lanzarote and Fuerteventura. A Jurassic oceanic crust is present underneath the islands as indicated by gabbro xenoliths in tholeiitic mid-ocean ridge basalt (MORB) (Schmincke et al., 1998).

La Palma is the north-westernmost, fifth-largest (706 km<sup>2</sup>) and second-highest (2430 masl) of the Canary Islands (Fig. 1). The geology of La Palma can be divided into three major units (Hausen, 1969). The first is formed by the older basal complex (ca. 4.0 to 3.0 Ma), which includes a Pliocene seamount and a plutonic complex

(Staudigel and Schmincke, 1984). The second is the older volcanic series (1.8 to 0.5 Ma) including Garafía volcano, Taburiente shield volcano, Bejenado edifice and Cumbre Nueva. The last geological unit (125 ka to present) is Cumbre Vieja, located at the southern part of the island.

Subaerial volcanic activity at La Palma started 1.8 Ma ago on the northern side of the island building Garafía volcano, which partly collapsed 1.2 Ma ago towards the southwest (Ancochea et al., 1994). The depression thus formed was filled by intense volcanism, resulting in Taburiente volcano, an edifice 25 km in diameter and approximately 3000 m in height (Troll and Carracedo, 2016). Its eruptions were mainly felsic, indicating magmatic evolution from basaltic to more differentiated magmas (Troll and Carracedo, 2016).

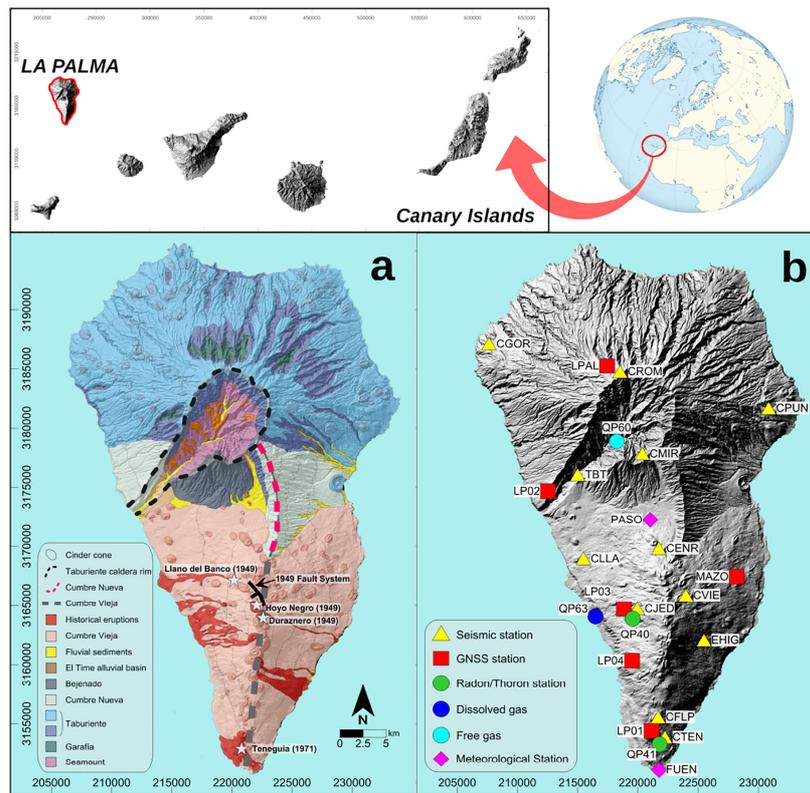


Fig. 1. Location of La Palma. a) Simplified geological map. Caldera de Taburiente rim, Cumbre Nueva and Cumbre Vieja rift (Troll and Carracedo, 2016), the 1949 fault system (IGME, 2010) and the last two historical eruptions are highlighted (Troll and Carracedo, 2016). b) The IGNS volcanic monitoring network and the two AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, 2019) meteorological stations, PASO and FUEN. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javalcoyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

The volcanic activity migrated southward during the advanced stages of Taburiente, culminating in Cumbre Nueva. This volcano underwent a giant landslide on its western flank 560 ka ago (Carracedo et al., 2001). The resulting depression, Valle de Aridane, led to the growth of Taburiente caldera (Fig. 1a), a spectacular eroded structure exposing part of the submarine edifice (Ancochea et al., 1994). Bejenado volcano then arose through the landslide deposits, and after a quiescent period, volcanic activity migrated southward 123 ka ago, building Cumbre Vieja.

At Cumbre Vieja, the most active basaltic volcanic field in the Canaries (Troll and Carracedo, 2016), vents are mainly located in a 20 km north-south rift reaching up to 1950 masl. All historical eruptions and their lava flows on La Palma have occurred in this volcanic field (Romero Ruiz, 1989), the last two being San Juan (1949) and Teneguía (1971) (Fig. 1a). San Juan involved three eruptive centers (Llano del Banco, El Duraznero and Hoyo Negro, Fig. 1a) and seismicity was felt even years before the eruption (Rubio, 1950). Petrological studies revealed the occurrence of three magma mixing events matching the timescales of the unrest activity (Albert et al., 2016). This eruption may have developed a normal fault system on the western flank of Cumbre Vieja (Fig. 1a). Some authors consider this structure a first sign of instability of the western flank of the monogenetic field (Day et al., 1999; Ward and Day, 2001), however a recent study by González et al. (2010) links that system with a flank stabilization.

Seismicity was felt from months to weeks before the onset of Teneguía eruption (Klügel et al., 1997) and there was one fatality due to gas emissions. The estimated erupted volume was  $4.3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$  (López Acevedo et al., 2014). Barker et al. (2015) reported magma storing depths comparable to those of the San Juan event, which showed deeper crystallization than early Cumbre Vieja events.

There is only one visible gas emanation point at La Palma. It is located inside Taburiente caldera (Dos Aguas, QP60 in Fig. 1b) and is a  $\text{CO}_2$ -rich bubbling cold spring with the highest  $(R/R_0)_c$  values reported for thermal fluids in the entire Canary Islands ranging between  $9.42 \pm 0.08$  to  $10.24 \pm 0.07$  (Pérez, 1994; Hilton et al., 2000; Padrón et al., 2012, 2015). Since those values are clearly above the MORB range (Graham, 2002), some authors have suggested a small but persistent component of plume-type helium (Day and Hilton, 2011; Padrón et al., 2015) in accordance with the hot-spot model proposed for the origin of Canary Islands (Carracedo et al., 1998).

### 3. Monitoring network and methodology

The volcanic monitoring network deployed on La Palma by the Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2019a) (hereinafter IGN) is shown in Fig. 1b. It is described here alongside the methodology employed in this work.

#### 3.1. Seismology

Prior to October 2017, the seismic monitoring network consisted of the stations TBT, EHIG, CPUN, CJED and CTEN. In the first fortnight of October 2017, CVIE, CENR, CROM, CGOR, CMIR, CLIA and CFP were added (yellow triangles in Fig. 1b). All had 3C broadband seismometers except CVIE, which had a short-period sensor. Sampling frequency was 100 Hz and data were transmitted in real-time to the IGN's network, *Red Sísmica Nacional* (hereinafter RSN). Earthquake locations and local magnitudes were determined using a 3-layer velocity model based on Dañobeitia (1985). Both P- and S-wave arrivals were manually picked for better constraint of focal depths. The seismic dataset used in this work was obtained from the Canarian earthquake catalog (IGN, 2019b) which is available online in real-time.

Besides the event histogram, seismic energy release estimation (Gutenberg and Richter, 1956), and difference in arrival time between P and S phases, two more analyses were made. First, in order to improve location of events and trying to find possible event alignments and/or

pattern, a relative relocation process using hypoDD software was applied (Waldhauser and Ellsworth, 2000). The only times employed were for phases P, weighted 1; and S, weighted 0.2 for the October 2017 swarm and 0.5 for February 2018 seismicity, were employed. Maximum distances between hypocenters of 4 km were chosen, and the condition number (Waldhauser, 2001) always remained between 40 and 80. Relocation errors were estimated with a 90% confidence level, relocating a random subset of the original events (Schultz et al., 2014). The second analysis was the determination of b-value and completeness magnitude (hereinafter  $M_c$ ). The b-value is a constant that characterizes every frequency-magnitude distribution (FMD) of the earthquake catalog (Gutenberg and Richter, 1944) reflecting the ratio between the number of large and small magnitude earthquakes. A global average b-value for complete catalogs is around 1 (Bridges and Gao, 2006). However, in highly fractured rock it shows higher values, and, in some volcanic regions, reaches values even higher than 3. This parameter has been used to identify active magma batches, and to study the spatial and temporal evolution of seismicity during unrest processes (McNutt, 2005; Ibáñez et al., 2012; López et al., 2017). The b-values were determined employing three different methods: least squares, maximum-likelihood (Aki, 1965), and bootstrap (using the maximum-likelihood method as estimator) with 1000 resamplings (Efron, 1982). The error estimation for each method was calculated as follows: i) for least squares the b-value error was obtained from the linear regression standard error, ii) for maximum-likelihood the improved uncertainty equation from Shi and Bolt (1982) and Marzocchi and Sandri (2003) was employed and, iii) for bootstrap the estimated error was determined by the standard error of the mean of the 1000 resamplings. The maximum number of events per magnitude method was applied to determine  $M_c$ , except for bootstrap where its value was the mean of all iterations. Though all methods are sensitive to the choice of  $M_c$ , in its estimation, the maximum curvature method proved to be very stable to sample size (Zhou et al., 2018).

#### 3.2. Geochemistry

The geochemical monitoring network included free and dissolved gas sampling points (blue circles in Fig. 1b) sampled since the beginning of 2016, and two stations for continuous monitoring of radon and thoron concentrations in soil (green circles in Fig. 1b).

Sampling point QP60, named Dos Aguas, is a  $\text{CO}_2$ -rich bubbling cold spring. Gas samples were collected every two-three months employing a submerged funnel. Using a syringe, gas flow was forced to pass through a lead-glass bottle where the sample was stored. In contrast, QP63 is a small well (2 m in depth, down to water level, and 70 cm in diameter approximately) located around 150 m from the sea. Even though its water level follows sea tides, its electrical conductivity ( $10\text{--}15 \text{ mS/cm}$ ) is clearly below the mean Atlantic Ocean value ( $50\text{--}57 \text{ mS/cm}$ ) (Friedman et al., 2017), and suggests a mix between sea and fresh water. Dissolved gas samples were taken every two-three months using the method described by Capasso and Inguaggiato (1998). Gas analyses, total composition and carbon and helium isotopic ratios were carried out at INGV laboratories in Palermo, Italy, following the methodology described by Paonita et al. (2012). In order to study a possible contribution of the crustal radiogenic helium ( $^4\text{He}_{\text{crust}}$ ), which could explain decreases and/or variations in air-corrected helium isotopic ratios (Sano et al., 2015),  $(R/R_0)_c$ , the procedure described by Ballentine et al. (2002) was followed.

The stations QP40 and QP41 continuously recorded radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) concentrations in soil by means of SARAD RTM2200, with sampling periods of 60 min. Both were installed in October 2017. Cylindrical PVC tubes, 70 cm long, 16 cm in diameter and sealed at the top, were buried 70 cm deep. Soil gas was pumped continuously (0.3 L/min) from the tubes to the SARAD monitors through a pneumatic closed circuit. A water trap was placed before the gas inlet of the instrument. Both stations also recorded barometric pressure, air

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

215 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilera  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

temperature and relative humidity inside the closed circuit. A multivariate regression analysis was tested, but due to the big distance among the meteorological stations (PASO and FUEN in Fig. 1b) and the radon/thoron monitors not conclusive results were obtained. Therefore, in order to remove most of the dependence on atmospheric parameters, 12-h and 24-h contributions (Fig. 1 in Supplementary material), zero-phase Butterworth low pass filters (Smith, 2007) were applied to radon and thoron concentration records.

### 3.3. Geodesy

The initial GNSS (Global Navigation Satellite System) network consisted of five dual frequency receivers: LPAL, LP01, LP02, LP03 and MAZO (red squares in Fig. 1b). All belonged to IGN except MAZO (GRAFCAN, 2019). During October 2017, station LP04 was deployed close to the area where seismicity was located. Data were transmitted in real-time to quantify daily surface deformation and three-dimensional displacements.

Daily coordinates were obtained using Bernese v5.2 (Dach et al., 2015), applying ocean-loading model FES2004 (Lyard et al., 2006) and the IGS (International GNSS Service) absolute antenna phase center models. Precise satellite IGS orbits were also considered. Plate movement was removed using the Nuvel-1A model (DeMets et al., 1994) and coordinates were determined using the ITRF2014 reference frame (Altamimi et al., 2016).

## 4. Results

In the following subsections, the geophysical and geochemical data acquired by the different sub networks are analyzed.

### 4.1. Seismic dataset

#### 4.1.1. Previous seismicity

Until May 2017, IGN had deployed two seismic stations on La Palma, TBT from November 1, 1974 to July 23, 2010 first with a short period sensor and later with a broadband sensor, and EHG (since January 15,

2002). These seismic stations located seven events between August 1, 2005 and October 1, 2017 (IGN, 2019b). Although the number of seismic stations was too low, swarms such as those described in this work would have been detected if they had occurred.

#### 4.1.2. First swarm

In the first fortnight of October 2017, at least 128 earthquakes were recorded and located by the RSN (Fig. 2a and Table 1). This seismic series was divided into two: from October 7 to 9 and, from October 13 to 14 (Fig. 2b) the maximum number of events was recorded on October 8, 46% of the total number. Mean hypocentral depth obtained from the seismic catalog was  $21.2 \pm 2.9$  km.

The relocated events for this swarm are shown in Fig. 3a with blue dots, while the initial event locations are plotted with white dots. From the 124 original events, 116 were successfully relocated, covering a large area and showing no spatial alignment but with a location predominantly westward from the Cumbre Vieja rift axis. Relocation errors are lower in depth than in the horizontal plane (Fig. 3a). The 90% confidence level ellipse plane shows a NE-SW direction in the horizontal plane, probably due to the seismic network geometry during this swarm.

Magnitudes ranged from 0.9 to 2.7 mblg, the estimation of the total seismic energy released in this period being  $2.88 \cdot 10^8$  J, of which 78% was released from October 7 to 9 (Fig. 2b).

The Mc result was very stable for this swarm, 1.4 mblg, but that was not the case for the b-value (top panel Fig. 2e and Table 1), probably due to the low number of events recorded (Nava et al., 2017) and the employed method (Section 3.1). The estimated error for maximum-likelihood method matches the estimation error for a 100 events sample determined by Bender (1983), 0.1 · b-value. The bootstrap result is in good agreement with the error range, 10% error, found by Bengouobou-Valérius and Gibert (2013) for a low sample size. Even so, in order to obtain a result closer to the real b-value characteristic of this swarm, the mean and its standard error  $1.6 \pm 0.1$  were selected. This procedure was followed for the second swarm as well.

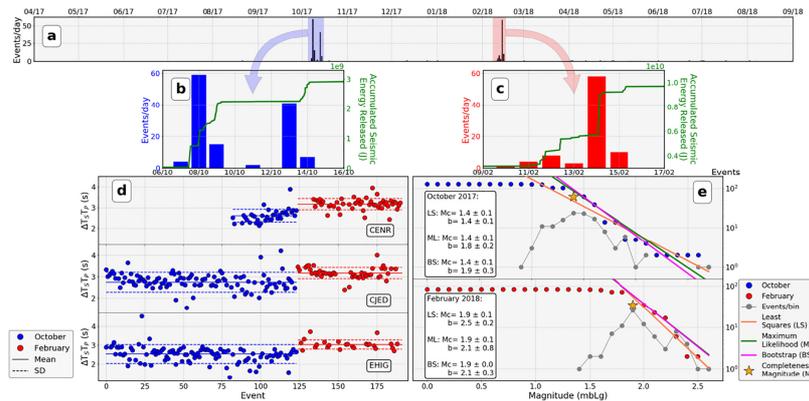


Fig. 2. Seismic data. a) Histogram of events from April 2017 to September 2018. Swarms on October 2017 (blue) and February 2018 (red) are highlighted. b) and c) Detailed histogram of the two swarms along with accumulated seismic energy released (green line). d) Time difference between P- and S- for each event in each swarm at the closest stations. e) Estimation of the Mc and b-value for each swarm. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

**Table 1**  
 Descriptive statistics of the two swarms.

Swarm	Depth (km)	Magnitude (mblg)	$\Delta E$ ( $\cdot 10^9$ J)	Estimated intruded volume ( $\cdot 10^{-4}$ km <sup>3</sup> )	Mc (mblg)	b-Value	$\Delta T_{5Tr}$ (s)	Number of events
October 2017	Max	33	$2.7 \pm 0.1$	1.9	$1.4 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.1$	CJED: 2.75	128
	Mean	21	$1.5 \pm 0.1$				CENR: 2.62	
	Min	12	$0.9 \pm 0.1$				EHIG: 2.54	
February 2018	Max	33	$2.6 \pm 0.1$	3.6	$1.9 \pm 0.1$	$2.3 \pm 0.2$	CJED: 3.18	84
	Mean	26	$2.0 \pm 0.1$				CENR: 3.17	
	Min	22	$1.4 \pm 0.1$				EHIG: 3.04	

4.1.3. Second swarm

From February 11 to 15, 2018, a total of 84 events were recorded (Fig. 2c), a lower number than during the first swarm. Their magnitude ranged from 1.4 to 2.6 mblg, and the estimated seismic energy released was  $6.68 \cdot 10^9$  J, twice that of the first swarm. It is important to note that on February 14, 69% of the earthquakes were recorded, corresponding to 53% of the total energy released.

For this swarm, the b-value error is higher for the maximum-likelihood method than in the first. This is obviously due to the lower number of events with respect to the first swarm (Bender, 1983). Nevertheless, least squares and bootstrap show similar error values to the previous swarm. Following the same procedure, the mean and its standard error were determined in order to find a value closer to the real b-value,  $2.3 \pm 0.2$  (bottom panel Fig. 2e and Table 1). The Mc was  $1.9 \pm 0.1$  mblg. Both results were higher than for the first swarm.

The mean depth obtained from the catalog was  $26.4 \pm 2.3$  km, deeper than for the first swarm. This result is compatible with time differences between P- and S-phase,  $\Delta T_{5Tr}$  (Fig. 2d). The October events showed a lower mean value for  $\Delta T_{5Tr}$  at all stations than February events (Table 1). Relocation considering both swarms simultaneously also confirms the depth difference (Fig. 3c).

In Fig. 3b, the relocated events for this swarm are shown with red dots while unrelocated event locations are plotted with white dots. From the 84 initial events, 80 were successfully relocated. In contrast to the relocation result for the first swarm (blue dots Fig. 3a), for the second swarm both unrelocated and relocated events were mainly located below the Cumbre Vieja rift and its eastern flank. In this case, the relocated events seem to be grouped below the rift, at least a

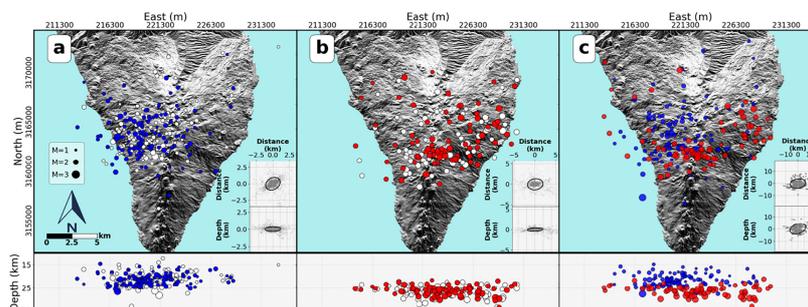
considerable number of them. The 90% confidence level ellipse shows an E-W direction.

By comparing the relocated events of both swarms (Fig. 3a and b), it seems that there was a slight eastward migration of seismicity. To confirm this, both series were relocated together (Fig. 3c). Since hypoDD software retrieves a relative relocation and both series were considered, it was possible to assert that the first swarm was located to the west of the second.

4.2. Geochemical dataset

Before October 2017, the air-corrected helium isotope ratio (Sakamoto et al., 1992),  $(R/R_a)_c$  showed a slight decrease at QP60 from a maximum value of  $9.95 \pm 0.07$  on September 2016 (Table 2) to  $9.16 \pm 0.07$ , one year afterwards (black dashed line Fig. 4a). In contrast,  $(R/R_a)_c$  increased slightly at QP63, reaching  $7.23 \pm 0.05$  on September 2017 (gray dashed line Fig. 4a). After the first swarm,  $(R/R_a)_c$  at QP60 showed a higher variation than before, between  $9.76 \pm 0.07$  and  $8.76 \pm 0.08$  (the lowest value in the entire dataset). Whereas at QP63,  $(R/R_a)_c$  reached the two highest values in the whole record,  $7.94 \pm 0.05$  after the first swarm and  $8.23 \pm 0.12$  after the second, afterwards were dropping to values below 7. During 2018 and the beginning of 2019, QP60 and QP63 presented similar trends (Fig. 4a).

In Fig. 5a,  $R/R_a$  ratios were plotted against  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  for both sampling points, QP60 and QP63. Due to the different sampling features, the mixing lines begin at two different points. Since at QP60 free gases were sampled, the start point is the relation for air:  $R/R_a = 1$  and  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 0.318$ , whereas at QP63 dissolved gas samples were taken, the initial point is the Air Saturated Water point (ASW):  $R/R_a$



**Fig. 3.** Relocation using hypoDD software. In panels a) and b), white circles represent original locations while blue (October 2017) and red (February 2018) are the relocated events. For the first swarm, the main relocation parameters were: WTCTP = 1, WTCTIS = 0.2, WRCT = 0.3, WDCT = 4, DAMP = 25 and CND = 47–70, while for the second they were: WTCTP = 1, WTCTIS = 0.2, WRCT = 0.2, WDCT = 4, DAMP = 20 and CND = 52–78. Panel c) shows the relocation (blue circles for the first swarm and red for the second), considering both seismic series together with the following parameters: WTCTP = 1, WTCTIS = 0.5, WRCT = 0.4, WDCT = 4, DAMP = 35 and CND = 46–67. In the right lower corner of each figure, an estimation of relocation error is shown, 90% confidence ellipse, ground plan (top) and depth (bottom). Acronyms stand for: WTCTP and WTCTIS, weight for catalog P- and S-wave respectively; WRCT, cutoff threshold for outliers located on the tails of the catalog data; WDCT, maximum event separation distance [km] for catalog data; DAMP, damping factor; and CND, condition number for the system of double-difference equations. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>  
 Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG  
 Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA Fecha: 06/10/2020 12:15:48  
 Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 12:59:14  
 José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 13:23:57  
 Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA 06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

6

PA. Torres-González et al. / Journal of Volcanology and Geothermal Research 392 (2020) 106757

**Table 2**  
 Descriptive statistics of the isotopic ratios and gas concentrations at sampling points QP60 and QP63.

Sampling point		$\delta^{13}\text{C-CO}_2$ (‰)	(R/R <sub>a</sub> ) <sub>c</sub>	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (ppm)	Samples
QP60	Max	-3.4 ± 0.1	9.95 ± 0.07	160.7	99.2 ± 3.0	2.7 ± 0.1	13
	Mean	-3.6 ± 0.1	9.58 ± 0.09	82.2	98.0 ± 0.2	1.1 ± 0.1	
	Min	-3.7 ± 0.1	8.76 ± 0.08	25.7	97.0 ± 3.0	1.0 ± 0.1	
QP63	Max	-7.1 ± 0.1	8.23 ± 0.12	2.75	56.6 ± 3.0	50.8 ± 2.5	15
	Mean	-8.3 ± 0.2	7.07 ± 0.15	1.43	14.7 ± 3.3	9.4 ± 3.8	
	Min	-10.3 ± 0.1	6.10 ± 0.06	0.44	3.8 ± 3.0	1.0 ± 0.1	

= 1,  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 0.285$ . Two different end-members were used since QP60 samples were clearly above the Mid-Ocean Rift Basalts (MORB) level,  $8 \pm 1 R_a$  (Graham, 2002), due to a slight plume-type helium contribution (Padrón et al., 2015). In contrast, QP63 samples fitted well with a standard MORB value.

In Fig. 4b, an estimation of crustal radiogenic helium ( $^4\text{He}_{\text{crust}}$ ) is shown. The highest variations were those of QP60 samples, reaching 1.3 ppm after the second swarm. At QP63 the  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  contribution was lower than at QP60, only noteworthy in March 2017.

The isotopic carbon dioxide composition,  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ , is shown in Fig. 4c. At QP60 it ranged from -3.4‰ to -3.7‰, exhibiting stability even during the swarm periods (Figs. 4c and 5b). In contrast, at QP63 there was an increase during 2017, reaching its maximum value on June 20, 2017, -7.1‰. During the swarm periods,  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  in QP63 ranged between -8.5‰ and -8.2‰, afterwards rising up to -7.3‰ on June 6, 2018 and later decreasing constantly to -10.3‰ (Fig. 4c).

At QP60, CO<sub>2</sub> concentration (Fig. 4d) remained stable, between 97 ± 3% and 99 ± 3%. Instead, the sampling point QP63 showed lower concentrations, fluctuating between 5.4 ± 3% and 23.3 ± 3% before October 2017. After the first swarm, CO<sub>2</sub> reached its maximum of 56.6 ± 3% at QP63, 2.4 times higher than before. During 2018, CO<sub>2</sub> remained

consistently below 20% at QP63. Plotting CO<sub>2</sub> concentration against  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  (Fig. 5b) for both sampling points shows the great difference between QP60 and QP63.

Hydrogen concentrations recorded at QP60 and QP63 are shown in Fig. 4e. Since the detection limit for H<sub>2</sub> was 1 ppm, values at QP60 remained lower than or close to this limit during practically the entire record. In contrast, in January 2017 hydrogen concentration reached a value of 15 ± 0.8 ppm at QP63, and the maximum was recorded before the first swarm, 50.8 ± 2.5 ppm. Before and after the second swarm, 20.5 ± 1.0 ppm and 31.8 ± 1.6 ppm were recorded respectively. During the summer of 2018 there was also a clear increase in [H<sub>2</sub>] reaching 11.7 ± 0.6 ppm on August 8, 2018.

During October 2017, the mean radon concentration at QP40 was 333 ± 160 Bq/m<sup>3</sup> (mean value ± standard deviation) (Fig. 6a4). After a data gap (power supply problems), radon showed higher values (599 ± 160 Bq/m<sup>3</sup>) until July 2018. There was a decrease from July to October 2018, fluctuating around 427 ± 209 Bq/m<sup>3</sup>. Afterwards, radon returned to slightly higher values, 741 ± 168 Bq/m<sup>3</sup>.

At QP41, radon increased constantly from the beginning, reaching a maximum of 1185 ± 53 Bq/m<sup>3</sup> at the end of February 2018 (Fig. 6b4). After another data gap (system failure) in June 2018, radon showed



**Fig. 4.** Dataset from sampling points QP60 (squares) and QP63 (circles). From top to bottom: a) air-corrected helium isotope ratio (R/R<sub>a</sub>)<sub>c</sub> and MORB range (Graham, 2002), b) crustal  $^4\text{He}$  contribution,  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  c)  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  vs VPDB and MORB range (Pineau and Javoy, 1983), d) carbon dioxide contribution, [CO<sub>2</sub>] and e) hydrogen concentration, [H<sub>2</sub>]. In each plot, both swarm periods are highlighted as vertical bars, October 2017 in blue and February 2018 in red. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

218 / 229

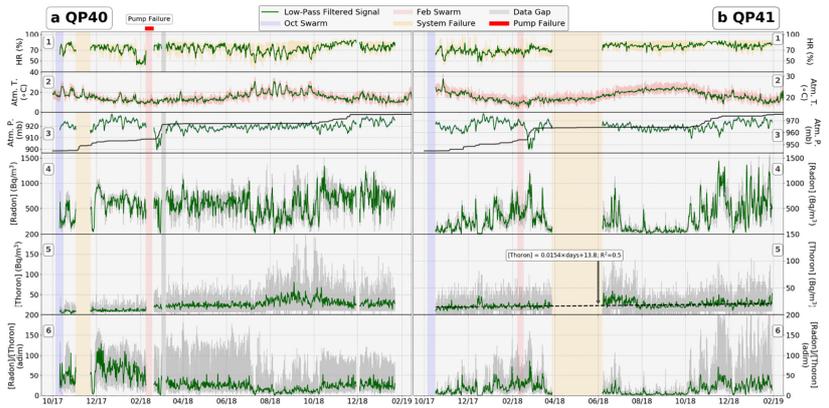
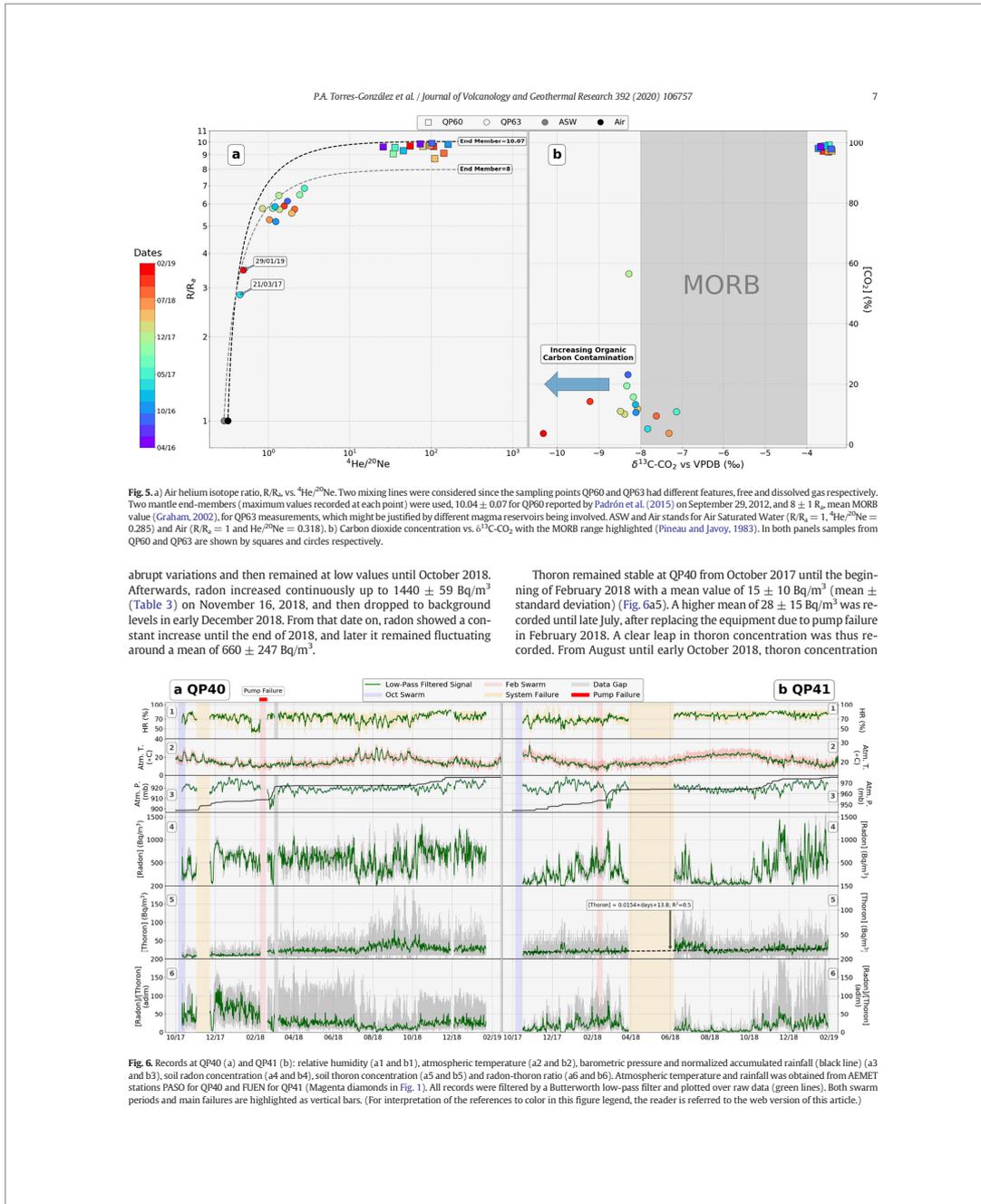
Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

**Table 3**  
 Descriptive statistics of the parameters recorded at both continuous radon/thoron stations.

Station		Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	Thoron (Bq/m <sup>3</sup> )	Atmospheric pressure (mb)	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Number of measurements
QP40	Max	1348 ± 57	404 ± 31	931.5 ± 4.7	46.2 ± 0.5	98.7 ± 1.9	10,184
	Mean	581 ± 37	25 ± 8	920.3 ± 4.6	21.4 ± 0.5	72.5 ± 1.5	
	Min	5 ± 3	0	899.1 ± 4.5	6.5 ± 0.5	32.4 ± 0.7	
QP41	Max	1440 ± 59	105 ± 15	976.9 ± 4.9	49.8 ± 0.5	99.2 ± 1.9	9580
	Mean	309 ± 27	19 ± 7	965.4 ± 4.8	22.9 ± 0.5	74.1 ± 1.5	
	Min	0	0	944.6 ± 4.7	11.7 ± 0.5	39.9 ± 0.8	

rose and remained around  $44 \pm 31$  Bq/m<sup>3</sup>, and then decreased slightly,  $40 \pm 21$  Bq/m<sup>3</sup>.

Thoron at QP41 remained stable (Fig. 6b5) around  $17 \pm 13$  Bq/m<sup>3</sup> (mean ± standard deviation) from the beginning of the series until April 2018, with the exception of a sharp increase in mid-December 2017, reaching  $34 \pm 9$  Bq/m<sup>3</sup>, coincident with a radon decrease (Fig. 6b4). During June and July 2018, thoron showed higher levels ( $27 \pm 18$  Bq/m<sup>3</sup>) until August, when it dropped to previous values. Afterwards, thoron exhibited a slight growth trend from a mean value of  $16 \pm 11$  Bq/m<sup>3</sup> during August 2018 to  $26 \pm 16$  Bq/m<sup>3</sup> in January 2019. In order to test this, a linear regression of the filtered thoron concentration signal was carried out. Its result, plotted in Fig. 6b5 as a dashed black line, shows a low but positive slope.

#### 4.3. GNSS dataset

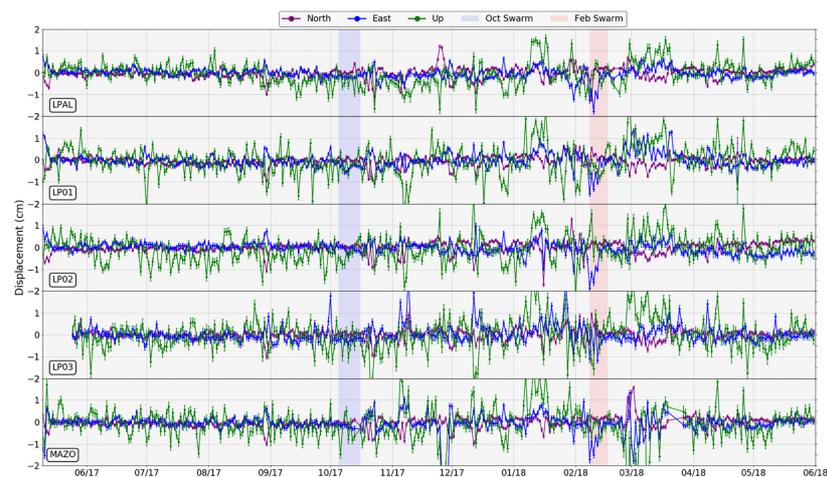
In Fig. 7, GNSS centered data from stations that were operative during both seismic swarms (LPAL, LP01, LP02, LP03 and MAZO) are plotted, covering from mid April 2017 to June 2018. Deformation components showed random variations below centimeter values. Due to its intrinsic lower accuracy, fluctuations in the up component were clearer (Santerre, 1991).

Throughout the whole analyzed period there was no surface deformation attributable to volcanic activity or seismic swarms. There were short time periods when the deformation signal underwent abrupt changes, but it always returned to previous values. No permanent displacement was recorded.

The fact that surface deformation was not observed does not dismiss the possibility of a magmatic intrusion. In order to estimate the maximum magma volume that could have intruded with no ground deformation detected by the GNSS network, a point magma source situated in the seismicity area at 25 km deep was simulated between the swarms (Fig. 8). The Mogi model (Mogi, 1958) shows that a volume of  $3 \cdot 10^{-2}$  km<sup>3</sup> would produce a permanent deformation of around 1 cm at the GNSS stations near the swarms: LP01, LP03, LP04 and MAZO (Table in Fig. 8).

The Mogi model was chosen since an estimated maximum magma volume was required. Furthermore, the direct problem had to be computed because in fact there were no deformation data for inversion. Moreover, the number of parameters of any model must be as low as possible since otherwise they would be the result of arbitrary assumptions. For these reasons, the Mogi model was the most suitable.

To sum up, it is possible that an intruded magma volume up to  $3 \cdot 10^{-2}$  km<sup>3</sup> at 25 km deep could produce deformations below the



**Fig. 7.** Records at GNSS stations from mid April 2017 to June 2018. Each panel shows daily components in cm. North, East and Up components are in purple, blue and green respectively. Seismic swarm periods are highlighted in blue for October 2017 and red for February 2018. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

220 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

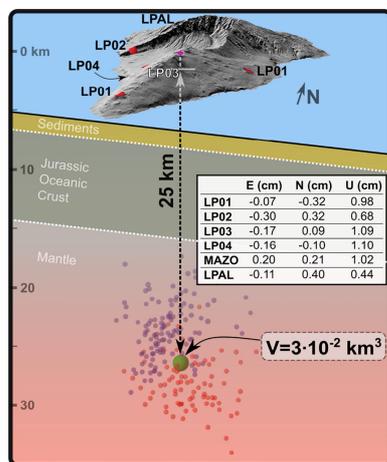


Fig. 8. Estimation of displacements in each component at each GNSS station assuming a Mogi model located at 25 km deep (not to scale) with a source of  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$  total volume. The two swarms are shown with blue dots for October 2017 and red for February 2018. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

1 cm detection threshold of the GNSS network. Any larger intrusion would have been detected.

### 5. Discussion

During 2016 and until September 2017,  $(R/R_0)_c$  at QP60 showed a constant decrease (black dashed line in Fig. 4a) from values between  $9.63 \pm 0.08$  and  $9.95 \pm 0.07$ , in the range of previously reported values (Hilton et al., 2000; Padrón et al., 2015), to  $9.16 \pm 0.07$ . A clear contribution of plume-derived helium relative to MORB-type typified QP60 (Padrón et al., 2015). This fact is reflected in  $R/R_0$  data at QP60 since they were clearly above the standard MORB value (Fig. 5a). Furthermore, the  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  values (Fig. 4c) were similar to those reported for Teide fumaroles (Melián et al., 2012), pointing to an endogenous origin (Pineau and Javoy, 1983) (Fig. 5b). Under these conditions, the maximum  $(R/R_0)_c$  ever measured at QP60,  $10.24 \pm 0.07$  (Padrón et al., 2015), can be considered as an end-member (Padrón et al., 2012). Therefore, the decrease recorded in  $(R/R_0)_c$  at QP60 could be related to an increase in crustal helium,  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  contribution (Tedesco, 1997; Capasso et al., 2005b; Padrón et al., 2013) as suggested by its estimation following the procedure described in Ballentine et al. (2002) (Fig. 4b). This extra  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  input could be linked to microfracturing due to the tectonic stress, releasing part of the radiogenic helium accumulated in the uppermost mantle and/or crust after uranium and thorium decay (Moreira et al., 2003; Lowenstern et al., 2014).

Instead,  $(R/R_0)_c$  exhibited a slight increase at QP63 prior to October 2017 (gray dashed line in Fig. 4a) reaching  $7.23 \pm 0.05$  on September 19, 2017. This growth was probably related to a  $^3\text{He}$ -rich magmatic gas input, as several authors have reported for other volcanic areas (Carapezza et al., 2004; Capasso et al., 2005a; Padrón et al., 2013; Sano et al., 2015; Rizzo et al., 2015). This  $^3\text{He}$  contribution seems to be related to a MORB end-member,  $8 \pm 1 R_0$  (Graham, 2002), as suggested by the

mixing curve for QP63 in Fig. 5a. This deep helium contribution was accompanied by  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  values measured at QP63, close to the MORB range (Pineau and Javoy, 1983) (Fig. 4c) and matching the highest values reported for this isotopic ratio in soil gases on La Palma (Padrón et al., 2015) with the exception of QP60. Together, these data suggest that this sampling point provides a preferential vent for deep magmatic gases (Capasso et al., 2005a; Padrón et al., 2012). As a result, QP63 showed an anomalous carbon dioxide concentration, visibly higher than the standard sea surface value (Sweeney et al., 2016).

Regarding the increase in  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  at QP63 prior to October 2017, reaching  $-7.1 \pm 0.1\text{‰}$  on June 20, 2017, it is important to note that in 2018 there was another growth during the same period (summer), suggesting a seasonal pattern. Taking into account the small amount of algae present at this sampling point,  $\text{CO}_2$  isotopic fractionation could take place during photosynthesis process (Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001), which is higher during summer, and hence, both slight increases in  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  may have been due to this fact.

Another anomalous gaseous emission at QP63 was detected in the hydrogen concentration,  $[\text{H}_2]$ , prior to October 2017. On February 17, 2017 and on September 19, 2017, 16 days before the first swarm,  $[\text{H}_2]$  reached  $15.0 \pm 0.8$  and  $50.8 \pm 2.5$  ppm respectively, compared to a base level for  $[\text{H}_2]$  in air of 0.5 ppm (Derwent et al., 2019). These increases could be related to stress-induced micro fracturing (Ito et al., 1999; Saruwatari et al., 2004) prior to the first swarm in October 2017. However, a biological origin is not unlikely since QP63 is a very small well close to the sea with a small amount of algae present (Das and Veziroglu, 2001). Since there was no seasonal trend in  $[\text{H}_2]$  at QP63 related to algal photosynthesis (Kirk, 1994) the first hypothesis seems more plausible. Another fact that supports the stress-induced microfracturing explanation is the good correlation between  $[\text{H}_2]$  at QP63 and estimated  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  at QP60, even when the sampling dates do not match exactly. Both gaseous species have been related with rock stress and microfracturing (Tedesco, 1997; Ito et al., 1999; Saruwatari et al., 2004; Capasso et al., 2005a; Padrón et al., 2013), and in the recorded dataset each increase in hydrogen concentration matches rises in crustal helium (Fig. 4b and e).

As mentioned, in October 2017 at least 128 earthquakes were detected and located (Table 1). Three different methods for b-value estimation reported results higher than one (top panel in Fig. 2e). It is noteworthy that two of them, maximum-likelihood and bootstrap, both widely used to determine the b-value, showed acceptable errors (Bender, 1983; Bengoubou-Valérius and Gibert, 2013). This b-value points to the leading role of magmatic fluids, gases and/or magma, in the seismicity, as reported in several volcanic areas (McNutt, 2005; Ibáñez et al., 2012; López et al., 2017).

Besides the b-value for the first swarm, other important data must be taken into account. The depth of seismicity matched the deepest magma storage level identified by Klügel et al. (2005) on a petrological basis (A in Fig. 9a). At this depth, between 15 and 26 km (430–780 MPa), clinopyroxenes showed a high degree of crystallization suggesting a long equilibrium period in the range of years or decades. This indicates that magma intrusions beneath Cumbre Vieja have usually halted at least once during their ascent, although several authors have reported a multi-stop ascent, with up to three levels (Klügel et al., 2000, 2005; Galipp et al., 2006; Barker et al., 2015).

On November 23, 2017, the  $(R/R_0)_c$  and  $\text{CO}_2$  concentration rose at QP63 up to  $7.94 \pm 0.05$  and  $56.6 \pm 3.0\%$  respectively (Fig. 4a and d). Recorded a month and a half after the first swarm, these two increases were probably linked to new fractures associated with the seismicity, which provided new ascent paths for magmatic gases as reported in other volcanic areas (Chiodini et al., 2001; Granieri et al., 2003; Carapezza et al., 2009; Padrón et al., 2012) (Fig. 9b). As mentioned, sampling point QP63 is located close to the area where the first swarm was located and seems to provide a preferential path for magmatic deep gases, based on its  $(R/R_0)_c$  and  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  values.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

221 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
--	----------------------------

10

PA. Torres-González et al. / Journal of Volcanology and Geothermal Research 392 (2020) 106757

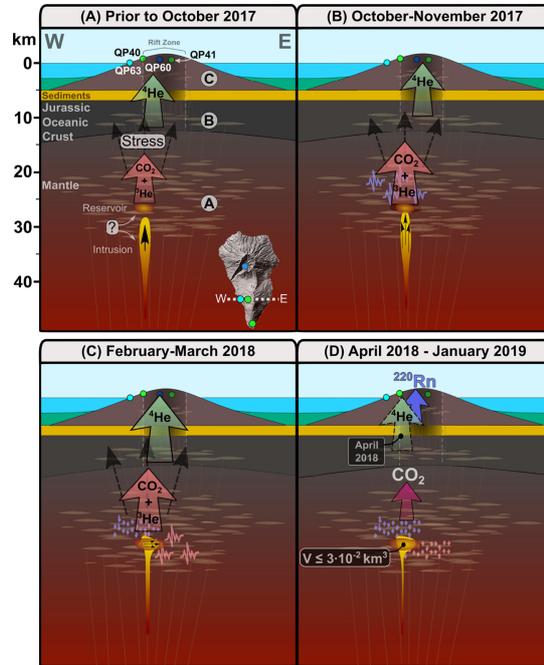


Fig. 9. Sketches showing east-west cross sections of Cumbre Vieja for each phase discussed in Section 5.1. Letters A, B and C stand for magma stagnation levels from Klügel et al. (2005).

Therefore, the most plausible explanation for the dataset prior to October 2017 is an ascending degassing magma batch from depth, and/or an active magma reservoir located at level A as identified by Klügel et al. (2015), which has become destabilized (Phases A and B in Fig. 9 and Table 4). This conclusion is based on: i) increase in  $(R/R_0)_c$  at QP63 prior to October 2017 that could be related to a magmatic gas input (Carapezza et al., 2004; Capasso et al., 2005b; Padrón et al., 2013; Sano et al., 2015); ii) increases in  $[H_2]$  at QP63 and  $^4He_{crust}$  at QP60 attributable to a micro fracturing process due to increased tectonic stress (Ito et al., 1999; Moreira et al., 2003; Saruwatari et al., 2004; Lowenstern et al., 2014); iii) a decrease in  $(R/R_0)_c$  at QP60 due to  $^4He_{crust}$  (Tedesco, 1997; Capasso et al., 2005b; Padrón et al., 2013); iv) a b-value above the pure tectonic value for the first swarm pointing to a contribution from magmatic fluids, gas and/or magma (McNutt, 2004; Ibáñez et al., 2012; López et al., 2017); v) the seismicity depth that matches the deepest magma stagnation level identified by several authors for historical eruptions at La Palma (Klügel et al., 2005; Galipp et al., 2006; Barker et al., 2015); and vi) increases in  $(R/R_0)_c$  and  $[CO_2]$  after the first swarm at the closest sampling point (QP63), which may be linked to a growth in magmatic gas emission and/or fractures linked to seismicity that provided new ascending paths for deep gases (Chiodini et al., 2001; Granieri et al., 2003; Carapezza et al., 2009; Padrón et al., 2012).

Whether caused by a magmatic intrusion and/or an active reservoir, the intruded or expanded volume can be estimated from the cumulative seismic moment of the volcano-tectonic (VT) events (White and McCausland, 2016). To convert the mBlg magnitude of close volcano-tectonic earthquakes to seismic moment, the equation reported by Hanks and Kanamori (1979) for surface waves was applied (Eq. (1)).

$$\log_{10} \text{Moment} = 16.1 + \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \text{mBlg} \quad (1)$$

Following the procedure described in White and McCausland (2016), based on VT events, an intruded volume of  $1.9 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$  was estimated applying the following equation (White and McCausland, 2016):

$$\log_{10} V = 0.77 \cdot \log_{10} \left( \sum \text{Moment} \right) - 5.32 \quad (2)$$

If a stagnated magmatic intrusion was the real situation, this estimated value would be only the volume increased and not the entire volume.

In order to explain the seismicity depth, two factors may play an important role. First, since not all magmatic intrusions reach the surface (Albert et al., 2015), and considering the eruptive history of La Palma

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

222 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

**Table 4**  
 Phases identified and summary of their main geochemical and geophysical characteristics.

Phase	(R/R <sub>0</sub> ) <sub>c</sub>	δ <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> vs. VPDB	[CO <sub>2</sub> ]	[H <sub>2</sub> ]	Thoron	Seismicity
A Prior to October 2017	• Decrease at QP60 from 9.95 ± 0.07 to 9.16 ± 0.07 in September 2017 • Slight increase at QP63 up to 7.23 ± 0.05 in September 2017	• Steady values at QP60 between -3.7 ± 0.1‰ and -3.4 ± 0.1‰ • Mean value of -7.95 ± 0.1‰ at QP63	• Values below 23% ± 3% at QP63	• On February 17, 2017, 15 ± 0.8 ppm at QP63 • On September 19, 2017, 16 days before the first swarm, [H <sub>2</sub> ] reached 50.8 ± 2.5 ppm at QP63	• No data	• Background seismicity level: 7 events located from August 2005 to October 1, 2017.
B October 2017	• Relative maximum of 7.94 ± 0.05 at QP63 on November 23, 2017	• Slight drop at QP63	• Maximum value of 56.6 ± 3.0% at QP63 on November 23, 2017	• Base level of 1 ppm	• Background levels at QP40 and QP41	• 128 events • Mean depth 21 km • b = 1.6 ± 0.1 • Mainly located below the west flank of Cumbre Vieja
C February–March 2018	• Maximum at QP63, 8.23 ± 0.12, on March 8, 2018	• Remains stable at QP63 around -8.4 ± 0.1‰	• Slight decrease at QP60 • Background levels at QP63	• Two anomalous values on January 23, 20.5 ± 1.0, and on March 8, 31.8 ± 1.6 at QP63	• Leap in concentration at QP40	• 84 events • Mean depth 26 km • b = 2.3 ± 0.2 • Slight eastward migration
D April 2018–January 2019	• Minimum value at QP60, 8.76 ± 0.08 • Drop at QP63 to 6.35 ± 0.06 • Similar trends at both points between March 2018 and January 2019	• Mean value of 7.66 ± 0.1‰ at QP63 until August 2018 • Afterwards, a decreasing trend at QP63	• Values around 97% ± 3% at QP60 • Below 20% at QP63	• 6.9 ± 0.4 and 11.7 ± 0.6 ppm in June and August 2018 respectively at QP63	• High level maintained at QP40 • Slight increase at QP41	• 17 seismic events

(Troll and Carracedo, 2016), the number of previous stalled magmatic intrusions could be really high. Thus magma cooled at that depth may have created strength barriers (Martí et al., 2016) against subsequent magma ascents (A in Fig. 9a). Second, for peridotitic mantle xenoliths found in the San Juan lava flows (1949), Klügel (1998) suggested an origin related to fracturation of peridotite host-rock during magma ascent through fractures and veins. In the same study, the authors estimate a 35 km depth for these xenoliths. Afterwards, Klügel et al. (2000) determined a 26–36 km depth range for the source of those peridotitic xenoliths sampled in the last eruptive event during the San Juan episode, at El Duraznero. Hence, taking into account these petrological results, fracturation of the host-rock in the upper-most mantle could be another possible explanation for low magnitude seismicity in October 2017 (Rubin, 1995). Hence, most likely one or a combination of the following two scenarios could explain the swarm occurrence, its depth and low magnitude: i) previous intrusions acting as strength barriers (Klügel, 1998; Klügel et al., 2000), ii) fracturation of the peridotite host-rock in the upper-most mantle (Rubin, 1995; Klügel, 1998).

Regarding radon concentration at QP40, the increase in its mean concentration before and after the power-supply issue in November 2017 (Fig. 6a4) was most probably related to seasonal behavior, since the same change occurred in October 2018. Indeed, this increase in radon concentration appeared to respond to atmospheric temperature (Cigolini et al., 2009). When the temperature clearly dropped below 20 °C, radon concentration increased (Fig. 6a4).

At QP41, radon followed the same pattern (Fig. 6b4). The constant increase in radon concentration after the first swarm matched the same increase from October 2018. As in QP40, this seasonal pattern seemed to be governed by atmospheric temperature (Cigolini et al., 2009), with increasing radon concentration when temperature decreased below 23 °C approximately. Thoron concentration at QP40 exhibited the same behavior as radon (Fig. 6a5), a slight increase probably also due to the influence of atmospheric parameters.

As mentioned, in February 2018 a new seismic series took place, with at least 84 events detected and located (Table 1). The second swarm released more seismic energy than the first. As in the previous swarm, the three methods used for b-value estimation reported results higher than one (bottom panel in Fig. 2e). The mean b-value calculated, 2.3 ± 0.2, suggests a role of magmatic fluids, gases and/or magma, in the seismicity as reported in other volcanic areas (McNutt, 1996; McNutt,

2005; Ibáñez et al., 2012; López et al., 2017). Seismicity was deeper, and this fact was confirmed by ΔT<sub>17</sub> and relocation results (Figs. 2d and 3c). Moreover, an eastward migration was not only reflected in raw seismicity location (white dots in Fig. 3a and b), but also by the relocation result (Fig. 3c). This seismicity displacement was likely related to the highly heterogeneous monogenetic volcanic fields at that depth, as mentioned. During its ascent or destabilization, the magma may have encountered a strength barrier, previous intrusion and/or high material heterogeneity (Klügel et al., 2005; Taisne et al., 2011; Barker et al., 2015; Martí et al., 2016; Martí et al., 2017), making lateral movement easier than vertical (Phase C in Fig. 9 and Table 4). A lateral magma movement is not unusual since it has been described in other volcanic systems (Einarsson and Brandsdóttir, 1978; Peltier et al., 2007), for instance the latest eruption in the Canary Islands, the submarine eruption at El Hierro (López et al., 2012; González et al., 2013; Klügel et al., 2015; Martí et al., 2017). It even has been suggested for La Palma based on petrological data (Klügel et al., 2000).

One more time, an increase in hydrogen concentration at QP63 was recorded, starting 18 days before the second swarm (Section 4.2 and Sampling data in Supplementary material) and reaching maximum on March 8, 2018. This increase, as also occurred in September 2017, was probably related to the stress-induced microfracturing and fractures associated with seismic events (Ito et al., 1999; Saruwatari et al., 2004).

At this point, it would be desirable to estimate the shape of the magma intrusion, but ground deformation data are normally required for that. Since no ground deformation was recorded and taking into account an estimated 21–26 km intrusion depth between the swarms, the lithostatic pressure and stress field at that depth would make the most probable intrusion shape a dike or dikes (Rubin, 1995; Hansteen et al., 1998), or even a sill (Hansteen et al., 1998; Gudmundsson, 2011). However, the intruded or expanded volume can be estimated based on VT events following the same procedure as for the first swarm (White and McCausland, 2016). Although the number of earthquakes was lower than in October 2017, the magnitudes led to a great intruded volume, 3.6 · 10<sup>-4</sup> km<sup>3</sup>. This result is practically double that in the first swarm, which could suggest a greater magma displacement.

On March 8, 2018, QP63 reached its highest (R/R<sub>0</sub>)<sub>c</sub> value (8.23 ± 0.12). It was the maximum value in the entire record at that sampling point (Fig. 4a). Fractures linked to both swarms probably facilitated a rapid gas ascent (Chiodini et al., 2001; Granieri et al., 2003; Carapezza

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilár UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 09/10/2020 05:03:40
---	----------------------------

et al., 2009; Padrón et al., 2012) as occurred after the first swarm in November 2017. Although the total number of earthquakes was lower in the second swarm, magnitudes were higher (Table 1), involving longer fractures (Olson and Allen, 2005).

Afterwards, on April 4, 2018, QP60 dropped to its minimum ( $R/R_0$ ), and QP63 also decreased (Fig. 4a). At QP60, the  $^4\text{He}_{\text{crust}}$  contribution was high on that date (Fig. 4b). These trends were probably associated with the crustal stress and seismicity that occurred in February 2018, releasing radiogenic helium through fracturation (Capasso et al., 2005a; Padrón et al., 2013; Lowenstern et al., 2014) (dashed arrow in Fig. 9d). This stress, most likely related to overpressure caused by the intruded magma, was also reflected in higher thoron concentration at QP40 in February 2018 (Fig. 6a5).

At QP40 there was a leap in its concentration during February 2018, after the second swarm, from a mean of  $15 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$  to  $28 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$  (mean  $\pm$  standard deviation) (Section 4.2). To be sure about this leap in thoron concentration, mean values along with 95% confidence levels were determined. In this way, during 15 days prior to the second swarm thoron concentration was  $19 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ , and  $26 \pm 2 \text{ Bq/m}^3$  during 15 days immediately after. These results have been proved applying Bootstrap method as well (Efron, 1982). This increase was confirmed by replacing the radon/thoron monitor by another calibrated monitor in July 2018, obtaining the same high concentration values (Section 4.2). Thus, it is possible to assert that the increase in thoron concentration was real. This leap could be related to tectonic stress, which would cause microfracturing and release thoron from radium chain decay (Giammanco et al., 2007; Tuccimei et al., 2010; Scarlato et al., 2013) (Phase D in Fig. 9). This process must have been relatively shallow since thoron has a short half-life and no simultaneous radon increase was recorded (Giammanco et al., 2007).

Thoron concentration at QP41 did not show any abrupt change after the second swarm, but a slight increase could have taken place. There are two results that may support this interpretation. On the one hand, the linear regression calculated for QP41 thoron record (Section 4.2). Although its  $R^2$  is not quite high enough, at least 50% of the variance is explained. On the other hand, analyzing monthly means, the slight increase in thoron concentration can be identified. For instance, if the mean values along with 95% confidence levels are calculated the following results are obtained: from mid-October 2017 to mid-November 2017,  $13 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; from mid-December 2017 to mid-January 2018,  $20 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; from mid-October 2018 to mid-November 2018,  $23 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ ; and, from mid-December 2018 to mid-January 2019,  $25 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$ . This slight increase could be related to the same tectonic stress process (Giammanco et al., 2007; Tuccimei et al., 2010; Scarlato et al., 2013) described for QP40. But since thoron concentration at QP41 showed a seasonal trend during summer in 2018 (Fig. 6b5), reflecting an atmospheric parameters influence, maybe, the long-term increase could be related with a long period meteorological influence as has been reported for radon (Cigolini et al., 2009; Laiolo et al., 2016). This question will be resolved analyzing the QP41 record when several years dataset has been acquired.

The slight eastward movement of seismicity (Section 4.1) could imply that the magma migrated closer to the Cumbre Vieja rift axis. This area is highly fractured since it has hosted many previous eruptions (Troll and Carracedo, 2016), providing preferential paths for deep gas ascent (Padrón et al., 2012). In this way, magmatic gases found an easier way to reach the surface through the rift zone, reflecting a gas-release migration towards the center of the monogenetic field. This could explain the constant decrease in  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  at QP63, possibly owing to a lesser input of deep gases and/or a higher biogenic contribution (Chiodini et al., 2008; Padrón et al., 2015) (Figs. 4c and 5b). Gas migration towards the east may also explain thoron concentration increases through time at QP40 and QP41 (Fig. 6a5 and b5). After the second swarm, these increases may be related to the slight growth in  $\text{CO}_2$  flux acting as a gas carrier (Neri et al., 2016) (Phase D in Fig. 9). This flux must have been small, since no clear increase in radon concentration

was recorded (Fig. 6a4 and b4) (Giammanco et al., 2007). Previous or new fractures in the rift or changes in the stress field could have facilitated  $\text{CO}_2$  ascent (Neri et al., 2016; Falsaperla et al., 2017).

Radon at QP40 did not show any change that could be related to the February swarm. Several months prior to the second swarm, it reached a maximum level that stayed around a mean value of  $599 \pm 160 \text{ Bq/m}^3$  until July 2018 (Fig. 6a4). Just after the second swarm, radon increased sharply at QP41, reaching its maximum value before the monitoring system failure (Fig. 6b4). This sharp increase was due to the rapid drop in barometric pressure (Cigolini et al., 2009) and rainfall (Fig. 6b3). From July 2018 to October 2018, radon showed a seasonal pattern with low concentrations during summer at both stations (Fig. 6a4 and b4), reflecting atmospheric temperature dependence as mentioned (Cigolini et al., 2009). It is likely that the differences between radon levels during the two cold periods (October–July) were linked with their different amounts of rainfall (black lines in Fig. 6a3 and b3) and hence, different soil moistures (Laiolo et al., 2016).

### 5.1. What will happen next?

Addressing this question is difficult for two main reasons. The first is the inherent complexity of monogenetic fields, and the second the scarce instrumental data on unrests and eruptions in the Canary Islands, particularly for La Palma.

As mentioned in the previous sections, several authors have identified different stagnation levels during magma ascent beneath Cumbre Vieja (Klügel et al., 2005; Galipp et al., 2006; Barker et al., 2015). The data analyzed in this work suggest a magmatic intrusion and/or an active magma reservoir at a depth that matches the deepest reported magma stagnation level (level A in Fig. 9a). It is possible to assert that the unrest described here corresponds to a stage previous to the underplating caused by magma stagnation (Barker et al., 2015; Galipp et al., 2006; Klügel et al., 2005) (level B in Fig. 9a).

If a new magma intrusion took place, was this new batch of magma feeding a previous reservoir or was it creating a new one? Based on the geochemical and geophysical data reported here it is not possible to answer this question. However, taking into account that seismicity has been monitored on La Palma since 1974 without any previously reported seismic crisis (Section 4.1.1), this absence supports the idea of an incipient process.

If the magma stagnation process continues, it would not be surprising to record new unrest periods like that described in this work, including seismicity and gas emissions. This may occur in the coming years or decades according to the petrological data, since some authors have reported magma stagnation times in this time range based on the growth equilibrium time for clinopyroxene crystals at that depth (Klügel, 1998; Klügel et al., 2000, 2005; Barker et al., 2015). Furthermore, if the stalled volume exceeds  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$  at that depth, ground deformation would be detected by the GNSS network (Section 4.3).

## 6. Conclusions

Data analysis suggests that a deep magmatic intrusion took place beneath Cumbre Vieja, and several results support this hypothesis.

The two seismic swarms had high b-values of  $1.6 \pm 0.1$  and  $2.3 \pm 0.2$  respectively, indicating a major contribution of magmatic fluid contribution, gas and/or magma. Increase in air-corrected helium isotopic ratio, ( $R/R_0$ ), from  $6.10 \pm 0.06$  to  $7.52 \pm 0.05$  and hydrogen concentration were recorded several months prior to the first swarm at the closest sampling point, QP63. This sampling point showed  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  values close to the MORB range suggesting that QP63 was a preferential vent for deep magmatic gases. At the same site, an anomalously high  $\text{CO}_2$  concentration,  $56.6 \pm 3.0\%$ , was registered between the two swarms, October 2017 and February 2018. Additionally, before and after this last swarm an increase in hydrogen concentration was recorded, and after each swarm, ( $R/R_0$ ), reached its maximum values,  $7.94 \pm 0.05$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

224 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

on November 23, 2017 and  $8.23 \pm 0.12$  on March 3, 2018, once again at QP63.

Eastward magma migration towards Cumbre Vieja rift in February 2018 was deduced from both raw seismicity location and relocation of swarms, and was reflected in the decreasing  $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$  at QP63 after mid-2018. Since fracturing is more extensive in the rift zone, magma migration could have increased  $\text{CO}_2$  emission in that area after the second swarm. A leap in thoron concentration at QP40 in February 2018 was recorded, supporting this hypothesis in which, carbon dioxide acts as a carrier gas. Permanent increases in thoron background at QP40 and QP41 support the mentioned growth in  $\text{CO}_2$  emission, as does the finding that the stress process is still going on, facilitating the shallow thoron release. In the thoron case at QP41 a long-term atmospheric influence cannot be excluded due to its slight variation.

Although no ground deformation was observed, the maximum magma volume that could intrude without being detected by the GNSS network was estimated. The result was a maximum undetectable volume of  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$ . On the other hand, the minimum intrusion volumes based on the cumulative seismic moment of the volcano-tectonic events for both swarms were calculated at  $1.9 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$  and  $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$  respectively, adding up to a total of  $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$ . Therefore, the true intrusion volume can be conjectured as between  $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$  and  $3 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$ .

Finally, since the presented geophysical and geochemical data support this magmatic intrusion, and the seismicity depth matched the deepest magma stagnation level reported for the last two historical eruptions on La Palma (San Juan and Teneguía), it can be argued that Cumbre Vieja is undergoing a reawakening process.

Taking into account the previously reported petrological results, and assuming that the volcanic process is still going on, future unrest episodes should not be dismissed, nor even a possible eruptive process. Although probably distant in time, in the range of several years to even decades, this is a feasible scenario. For this reason, it is extremely important to maintain a proper volcanic monitoring system at Cumbre Vieja, which includes increasing the number of stations (seismic, geodesic and geochemical), and the number of gas sampling points.

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106757>.

#### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Acknowledgments

The authors wish to thank the IGN volcanic monitoring team and RSN for their invaluable work, particularly Carmen Del Fresno, Laura García Cañada and Víctor Villasante Marcos, from IGN, for their suggestions and corrections to improve this study. We also wish to thank Ana Isabel Jiménez and José Manuel Fraga from the Analytical Chemistry Department at La Laguna University, Tenerife, Spain, for their suggestions. Finally we also thank Guido Jones, scientific English editor at the Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA) of the Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Tenerife, Spain, for revising the text. The Instituto Geográfico Nacional (IGN; Ministerio de Fomento, Spanish Government) funded this research.

#### Appendix A. Sampling and analytical methods for the sites QP60 and QP63

During the whole sampling period care was taken to use always the same materials and also to maintain constant sampling and analytical methods. Besides this, the field workers responsible for taking the gas samples were always the same.

Bubbling gases (QP60) were sampled using an inverted funnel positioned above the sampling point storing the gas in lead glass flasks equipped with two vacuum stopcocks. Samples for dissolved gas analyses (QP63) were collected in 160 ml glass vials sealed underwater with silicon/rubber septa using special pliers. All samples were collected with care to avoid even the tiniest bubbles to prevent atmospheric contamination.

At the INGV laboratory in Palermo, the concentrations of  $\text{He}$ ,  $\text{H}_2$ , and  $\text{CO}_2$ , in the samples were determined by an Agilent 7890B gas chromatograph equipped with a 4-m Carbosieve 5 II and PoraPlot-U columns and a TCD detector using Ar as gas carrier. The analytical errors were always within  $\pm 5\%$  for  $\text{He}$  and  $\text{H}_2$ , and  $3\%$  for  $\text{CO}_2$ . Quantification limits were 1 ppm for  $\text{H}_2$ , 2 ppm for  $\text{He}$  and 50 ppm for  $\text{CO}_2$ .

The bubbling gas samples were directly injected into the gas chromatograph, while dissolved gas samples were extracted after equilibrium was reached at constant temperature with a host-gas (high-purity Ar) injected into the sample bottle. The chemical composition of the dissolved gas phase was obtained from the gas chromatographic analyses, taking into account the solubility coefficients (Bunsen coefficient "b", ccgas/mlwater STP) for each gas species, the volume of gas extracted and the volume of the water sample (Capasso and Inguaggiato, 1998; Liotta and Martelli, 2012; Italiano et al., 2014). Starting from the total amount of dissolved gases (ccSTP/L) we calculated the relative abundances for every single gas species in equilibrium with the dissolved gas phase. The analytical results were expressed in volumetric units (% or ppm), allowing the comparison of dissolved and free gas results.

The  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of  $\text{CO}_2$  (expressed as  $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$  ‰ vs. VPDB) were measured with a Finnigan Delta S mass spectrometer after purification of the gas mixture by standard procedures using cryogenic traps (precisions  $\pm 0.1\%$ ). The  $\delta^{13}\text{C}$  values of total dissolved inorganic carbon (TDIC) were determined by acid extraction, following the method proposed by Capasso et al. (2005a). The theoretical carbon isotope composition of  $\text{CO}_2$  in equilibrium with the TDIC of the samples was calculated according to Zhang et al. (1995).

The abundance and isotope composition of  $\text{He}$ , and the  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  ratios, were determined by separately admitting  $\text{He}$  and  $\text{Ne}$  into a split flight tube mass spectrometer (Helix SFT). Similarly to the chemical analysis, the isotopic composition of  $\text{He}$  in the dissolved gas was analyzed after equilibration with ultra-pure  $\text{N}_2$  and extraction from the sampling bottle headspace, as in the method of Inguaggiato and Rizzo (2004). Helium isotope compositions are given as  $R/R_a$ , where  $R$  is the ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) ratio of the sample and  $R_a$  is the atmospheric ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) ratio ( $R_a = 1.386 \times 10^{-6}$ ). The analytical errors were generally  $< 1\%$ . Measured values were corrected for atmospheric contamination of the sample ( $R/R_a$ ) on the basis of its  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  ratio (Sano and Wakita, 1985).

Samples were always sent by express courier to the laboratory and analyzed within two or three weeks. As pointed out by Italiano et al. (2014), basing on laboratory tests and theoretical diffusion data, errors introduced by such time intervals between sampling and analysis are always well within the analytical error.

#### References

- Agencia Estatal de Meteorología, 2019. State Meteorological Agency - AEMET - Spanish Government. Retrieved August 3, 2019, from <http://www.aemet.es/en/portada>.
- Aiuppa, A., Moretti, R., Federico, C., Giudice, G., Liuzzo, M., Gurrieri, S., et al., 2007. Forecasting Etna eruptions by real-time observation of volcanic gas composition. *Geology* 35 (12), 1115–1118. <https://doi.org/10.1130/G24149A.1>.
- Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.* 43, 237–239.
- Albert, H., Costa, F., Martí, J., 2015. Timing of magmatic processes and unrest associated with mafic historical monogenetic eruptions in Tenerife Island. *J. Petrol.* 56 (10), 1945–1966. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv058>.
- Albert, H., Costa, F., Martí, J., 2016. Years to weeks of seismic unrest and magmatic intrusions precede monogenetic eruptions. *Geology* 44 (3), 211–214. <https://doi.org/10.1130/G37239.1>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

225 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

14

PA. Torres-González et al. / Journal of Volcanology and Geothermal Research 392 (2020) 106757

- Altamimi, Z., Rebeschung, P., Métivier, L., Collilleux, X., 2016. ITRF2014: a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013088>.
- Aucochea, E., Herán, F., Cendrero, A., Cantagrel, J.M., Fúster, J., Ibarrola, E., Coello, J., 1994. Constructive and destructive episodes in the building of a young Oceanic Island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 60 (3), 243–262. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90054-X).
- Balentine, C.J., Burgess, R., Marty, B., 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Rev. Mineral. Geochem.* 47 (1), 539–614. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13>.
- Barker, A.K., Troll, V.R., Carracedo, J.C., Nicholls, P.A., 2015. The magma plumbing system for the 1971 Teneigua eruption on La Palma, Canary Islands. *Contrib. Mineral. Petrol.* 170 (5), 54. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1207-7>.
- Bender, B., 1983. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73 (3), 831–851.
- Bengoubou-Valérius, M., Gilbert, D., 2013. Bootstrap determination of the reliability of b-values: an assessment of statistical estimators with synthetic magnitude series. *Nat. Hazards* 65 (1), 443–459. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0376-1>.
- Boué, A., Lesage, P., Cortés, G., Valette, B., Reyes-Dávila, C., 2015. Real-time eruption forecasting using the material Failure Forecast Method with a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120 (4), 2143–2161. <https://doi.org/10.1002/2014JB011637>.
- Bridges, D.L., Gao, S.S., 2006. Spatial variation of seismic b-values beneath Makushin Volcano, Unalaska Island, Alaska. *Earth Planet. Sci. Lett.* 245 (1), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.010>.
- Capasso, G. & Inguaggiato, S. (1998). A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano Island. *Appl. Geochem.* 13 (5), 631–642. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00109-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00109-1).
- Capasso, G., Carapezza, M.L., Federico, C., Inguaggiato, S., Rizzo, A., 2005a. Geochemical monitoring of the 2002–2003 eruption at Stromboli volcano (Italy): precursory changes in the carbon and helium isotopic composition of fumarole gases and thermal waters. *Bull. Volcanol.* 68 (2), 118–134. <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0427-5>.
- Capasso, G., Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S., Longo, L., 2005b. On-line technique for preparing and measuring stable carbon isotope of total dissolved inorganic carbon in water samples (d13CDIC). *Ann. Geophys.* 48 (1). <https://doi.org/10.4401/ag-3190-2005>.
- Carapezza, M., Inguaggiato, S., Brusca, L., Longo, M., 2004. Geochemical Precursors of the Activity of an Open-conduit Volcano: The Stromboli 2002–2003 Eruptive Events. *vol.* 31. <https://doi.org/10.1029/2004GL019614>.
- Carapezza, M.L., Ricci, T., Ranaldi, M., Tarchini, L., 2009. Active degassing structures of Stromboli and variations in diffuse CO<sub>2</sub> output related to the volcanic activity. *The 2007 Eruption of Stromboli* 182 (3), 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.08.006>.
- Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J.A., Pérez Torrado, F.J., 1998. Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geol. Mag.* 135 (5), 501–504. <https://doi.org/10.1017/S0016758898001447>.
- Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., Torrado, F.J.P., 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estud. Geol.* 57, 5–6. <https://doi.org/10.3989/egesol01575-6134>.
- Chiodini, G., Frontini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., Ventura, G., 2001. CO<sub>2</sub> degassing and energy release at Solfataro volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 106 (B8), 16213–16221. <https://doi.org/10.1029/2001JB002046>.
- Chiodini, G., Caffro, S., Cardellini, C., Avino, R., Granieri, D., Schmidt, A., 2008. Carbon isotopic composition of soil CO<sub>2</sub> efflux: a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO<sub>2</sub> degassing in volcanic-hydrothermal areas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 274 (3), 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.051>.
- Cigolini, C., Poggi, P., Rippepe, M., Laiolo, M., Ciambrellini, C., Donne, D.D., et al., 2009. Radon surveys and real-time monitoring at Stromboli volcano: Influence of soil temperature, atmospheric pressure and tidal forces on <sup>222</sup>Rn degassing. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 184 (3), 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.019>.
- Cruz-Reyna, S.D., I. Yokoyama, L., 2011. A geophysical characterization of monogenetic volcanism. *Geofis. Int.* 50, 465–484.
- Dach, R., Andritsch, F., Arnold, D., Bertone, S., Friede, P., Jäger, A., et al., 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>.
- Dañobettia, J.J., Urdias Vallina, A., Universidad Complutense de Madrid, 1985. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Física de la Tierra, A. y A. I. Estudio geofísico submarino en el área del Archipiélago Canario Retrieved from WorldCat.org.
- Das, D., Vezirglu, T.M., 2001. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *Int. J. Hydrog. Energy* 26 (1), 13–28. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00058-6).
- Day, J.M.D., Hilton, D.R., 2011. Origin of <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios in HIMU-type basalts constrained from Canary Island lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 305 (1), 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.006>.
- Day, S.J., Carracedo, J.C., Guillou, H., Gravelot, P., 1999. Recent structural evolution of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcano flank instability? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 94 (1), 135–167. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00101-8).
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 21 (20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.
- Derwent, R.C., Simmonds, P.G., O'Doherty, S.J., Manning, A.J., Spain, T.G., 2019. A 24-year record of high-frequency, in situ, observations of hydrogen at the Atmospheric Research Station at Mace Head, Ireland. *Atmos. Environ.* 203, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.050>.
- Efron, B., 1982. The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans. Society for Industrial and Applied Mathematics <https://doi.org/10.1137/1.9781611970319>.
- Einarsson, P., Brandsdóttir, B., 1978. Seismological Evidence for Lateral Magma Intrusion During the July 1978 Deflation of the Krafla Volcano in NE-Iceland. United States. <https://doi.org/10.2138/989064>.
- Falsaperla, S., Behncke, B., Langer, H., Neri, M., Salerno, G.G., Giammarco, S., et al., 2014. "Failed" eruptions revealed by pattern classification analysis of gas emission and volcanic tremor data at Mt. Etna, Italy. *Int. J. Earth Sci.* 103 (1), 297–313. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0964-7>.
- Falsaperla, S., Neri, M., Di Grazia, G., Langer, H., Spampinato, S., 2017. What happens to in-soil Radon activity during a long-lasting eruption? Insights from Etna by multidisciplinary data analysis. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 18 (6), 2162–2176. <https://doi.org/10.1002/2017GC006825>.
- Friedman, A.R., Reverdin, G., Khodri, M., Gastineau, G., 2017. A new record of Atlantic sea surface salinity from 1896 to 2013 reveals the signatures of climate variability and long-term trends. *Geophys. Res. Lett.* 44 (4), 1866–1876. <https://doi.org/10.1002/2017GL072582>.
- Galipo, K., Klügel, A., Hansteen, T.H., 2006. Changing depths of magma fractionation and stagnation during the evolution of an oceanic island volcano: La Palma (Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 155 (3), 285–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.04.002>.
- Giammarco, S., Sims, K.W.W., Neri, M., 2007. Measurements of <sup>222</sup>Rn and <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub> emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 8 (10). <https://doi.org/10.1029/2007GC001644>.
- González, P.J., Tiampo, K.F., Camacho, A.G., Fernández, J., 2010. Shallow flank deformation at Cumbre Vieja volcano (Canary Islands): implications on the stability of steep-sided volcano flanks at oceanic islands. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297 (3), 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.07.006>.
- González, P.J., Samsonov, S.V., Pepe, S., Tiampo, K.F., Tizzani, P., Casu, F., et al., 2013. Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (8), 4361–4377. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50289>.
- GRAFICAN, 2019. Estaciones GNSS de Canarias. Retrieved February 11, 2019, from [https://idecan2.grafic.es/Service/WMS/GNSS?SERVICE=WMS&VERSION=1.1.1&REQUEST=GetFeatureInfo&STYLES=BX=325&L=225&BBOX=22699458157305082295359570667103.82041952184269483307830.6493328963&WIDTH=1306&HEIGHT=580&QUERY\\_LAYERS=Estaciones&LAYERS=Estaciones&INFO\\_FORMAT=text/html&FORMAT=image/png](https://idecan2.grafic.es/Service/WMS/GNSS?SERVICE=WMS&VERSION=1.1.1&REQUEST=GetFeatureInfo&STYLES=BX=325&L=225&BBOX=22699458157305082295359570667103.82041952184269483307830.6493328963&WIDTH=1306&HEIGHT=580&QUERY_LAYERS=Estaciones&LAYERS=Estaciones&INFO_FORMAT=text/html&FORMAT=image/png).
- Graham, D., 2002. Noble gases in MORB and OIB: observational constraints for the characterization of mantle source reservoirs. *Res. Mineral. Geochim.* 46, 247–318.
- Granieri, D., Chiodini, G., Marzocchi, W., Avino, R., 2003. Continuous monitoring of CO<sub>2</sub> soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212 (1), 167–179. [https://doi.org/10.1016/S0167-821X\(03\)00232-7](https://doi.org/10.1016/S0167-821X(03)00232-7).
- Gudmundsson, A., 2011. Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation. *Emplacement of Magma Pulses and Growth of Magma Bodies* 500 (1), 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.015>.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California<sup>1</sup>. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 34 (4), 185–188.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1956. Magnitude and energy of earthquakes. *Ann. Geophys.* 53 (1). [https://doi.org/10.4401/ag-4588\(2010\)](https://doi.org/10.4401/ag-4588(2010)).
- Hanks, T.C., Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 84 (B5), 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/J084B05p02348>.
- Hansteen, T.H., Klügel, A., Schminke, H.-U., 1998. Multi-stage magma ascent beneath the Canary Islands: evidence from fluid inclusions. *Contrib. Mineral. Petrol.* 132 (1), 48–64. <https://doi.org/10.1007/s004100050404>.
- Hasenaka, T., & S.E. Carmichael, I. (1985). The Cinder Cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their Age, Volume and Distribution, and Magma Discharge Rate (vol. 25). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90007-1).
- Hausen, H.M., 1969. Some Contributions to the Geology of La Palma (Canary Islands) & Hans Hausen. *Soc. Scientiarum Fennica*.
- Hilton, D.R., Macpherson, C.G., Elliott, T.R., 2000. Helium isotope ratios in mafic phenocrysts and geothermal fluids from La Palma, the Canary Islands (Spain): implications for HIMU mantle sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64 (12), 2119–2132. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00358-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00358-6).
- Ibáñez, J.M., De Angelis, S., Díaz-Moreno, A., Hernández, P., Alguacil, G., Posadas, A., Pérez, N., 2012. Insights into the 2011–2012 submarine eruption off the coast of El Hierro (Canary Islands, Spain) from statistical analyses of earthquake activity. *Geophys. J. Int.* 191 (2), 659–670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05629.x>.
- IGME, 2010. Mapa Geológico de la Isla de La Palma a escala 1:100.000. Retrieved July 31, 2019, from <http://info.igme.es/cartografadigital/geologica/mapa.aspx?parent=-/geologica/geologia/regional.aspx&id=6&language=es>.
- IGN, I. G. N. (2019a). Instituto Geográfico Nacional. Retrieved February 11, 2019, from <http://www.ign.es>.
- IGN, I. G. N. (2019b). Instituto Geográfico Nacional - Catalog. <https://doi.org/10.7914/5N/ES>.
- Inguaggiato, S., Rizzo, A., 2004. Dissolved helium isotope ratios in groundwaters: a new technique based on gas–water re-equilibration and its application to Stromboli volcanic system. *Appl. Geochem.* 19 (5), 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2003.10.009>.
- Italiano, F., Yuce, G., Uysal, I.T., Gasparon, M., Morelli, C., 2014. Insights into mantle-to-volatiles contribution from dissolved gases in artesian waters of the Great Artesian

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmeG	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 19:57:29

226 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguilar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

Basin, Australia. Chem. Geol. 378–379, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.04.013>.

Ito, T., Nagamine, K., Yamamoto, K., Adachi, M., Kawabe, L., 1999. Preseismic hydrogen gas anomalies caused by stress-corrosion process preceding earthquakes. Geophys. Res. Lett. 26 (13), 2009–2012. <https://doi.org/10.1029/1999GL900407>.

Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T., Shigeno, N., 2010. A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. J. Volcanol. Geotherm. Res. 189 (1), 158–171. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.002>.

Kirk, J.T., 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge university press.

Klügel, A., 1998. Reactions between mantle xenoliths and host magma beneath La Palma (Canary Islands): constraints on magma ascent rates and crustal reservoirs. Contrib. Mineral. Petrol. 131 (2), 237–257. <https://doi.org/10.1007/s004100050391>.

Klügel, A., Hansteen, T.H., Schmincke, H.-J., 1997. Rates of magma ascent and depths of magma reservoirs beneath La Palma (Canary Islands). Terra Nova 9 (3), 117–121. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1997.001-15.x>.

Klügel, A., Hoernle, K.A., Schmincke, H.-J., White, J.D.L., 2000. The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 105 (B3), 5997–6016. <https://doi.org/10.1029/1999JB900334>.

Klügel, A., Hansteen, T.H., Galipp, K., 2005. Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). Earth Planet. Sci. Lett. 236 (1), 211–226. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.006>.

Klügel, A., Longpré, M.-A., García-Cañada, L., Stov, J., 2015. Deep intrusions, lateral magma transport and related uplift at ocean island volcanoes. Earth Planet. Sci. Lett. 431, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.031>.

Laiolo, M., Ranaldi, M., Tarchini, L., Carapezza, M.L., Coppola, D., Ricci, T., Cigolini, C., 2016. The effects of environmental parameters on diffuse degassing at Stromboli volcano: insights from joint monitoring of soil CO<sub>2</sub> flux and radon activity. J. Volcanol. Geotherm. Res. 315, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.004>.

Lamolda, H., Felpeo, A., Bethencourt, A., 2017. Time lag between deformation and seismicity along monogenetic volcanic unrest periods: the case of El Hierro Island (Canary Islands). Geophys. Res. Lett. 44 (13), 6771–6777. <https://doi.org/10.1002/2017GL074994>.

Lee, S., Kang, N., Park, M., Hwang, J.Y., Yun, S.H., Jeong, H.Y., 2018. A review on volcanic gas compositions related to volcanic activities and non-volcanological effects. Geosci. J. 22 (1), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0056-y>.

Lioata, M., Martelli, M., 2012. Dissolved gases in brackish thermal waters: an improved analytical method. Geofluids 12 (3), 236–244. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2012.00365.x>.

López Acevedo, F.J., Pellicer Bautista, M.J., et al., 2014. Uso de Sistemas de Información Geográfica para el cálculo del volumen de los materiales emitidos en la erupción de 1971 del volcán Teneguía (La Palma, Islas Canarias).

López, C., Blanco, M.J., Abella, R., Brenes, B., Cabrera Rodríguez, V.M., Casas, B., et al., 2012. Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption. Geophys. Res. Lett. 39 (13), n/a. <https://doi.org/10.1029/2012GL051846>.

López, C., Benito-Saiz, M.A., Martí, J., del-Fresno, C., García-Cañada, L., Albert, H., Lamolda, H., 2017. Driving magma to the surface: the 2011–2012 El Hierro Volcanic Eruption. Geochim. Geophys. Geosyst. 18 (8), 3165–3184. <https://doi.org/10.1002/2017GC007023>.

Lowenstein, J.K., Evans, W.C., Bergfeld, D., Hunt, A.G., 2014. Prodigious degassing of a billion years of accumulated radiogenic helium at Yellowstone. Nature 506, 355.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. Ocean Dyn. 56 (5), 394–415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>.

Martí, J., López, C., Bartolini, S., Becerril, L., Geyer, A., 2016. Stress controls of monogenetic volcanism: a review. Front. Earth Sci. 4, 106. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00106>.

Martí, J., Villaseñor, A., Geyer, A., López, C., Tryggvason, A., 2017. Stress barriers controlling lateral migration of magma revealed by seismic tomography. Sci. Rep. 7, 40757.

Marzocchi, W., & Sandri, L. (2003). A review and new insights on the estimation of the b-value and its uncertainty. Ann. Geophys. Vol 46, No 6 (2003) DOI - <https://doi.org/10.4401/Ag-3472>. Retrieved from <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3472>.

McNutt, S.R., 1996. Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories. In: Scarpa, R., Tilling, R.L. (Eds.), Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 99–146. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_3).

McNutt, S.R., 2005. Volcanic seismology. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 33 (1), 461–491. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.052203.122459>.

Melián, C., Tass, F., Pérez, N., Hernández, P., Sortino, F., Vaselli, O., et al., 2012. A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide Volcano (Tenerife, Canary Islands): a geochemical evidence for the 2004–2005 seismic-volcanic crisis. Bull. Volcanol. 74 (6), 1465–1483. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0813-1>.

Mogi, K., 1958. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. Bull. Earthq. Res. Inst. 36, 99–134.

Moran, S.C., Newhall, C., Roman, D.C., 2011. Failed magmatic eruptions: late-stage cessation of magma ascent. Bull. Volcanol. 73 (2), 115–122. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0444-x>.

Moreira, M., Blusztajn, J., Curtice, J., Hart, S., Dick, H., Kurz, M.D., 2003. He and Ne isotopes in oceanic crust: implications for noble gas recycling in the mantle. Earth Planet. Sci. Lett. 216 (4), 635–643. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00554-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00554-5).

National Academies of Sciences, Engineering, & Medicine, 2017. Volcanic Eruptions and Their Repose. Unrest, Precursors, and Timing. The National Academies Press, Washington, DC <https://doi.org/10.17226/24650>.

Nava, F.A., Márquez-Ramírez, V.H., Zúñiga, F.R., Avila-Barrientos, L., Quinteros, C.B., 2017. Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. J. Seismol. 21 (1), 127–135. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9588-1>.

Needham, A.J., Lindsay, J.M., Smith, I.E.M., Augustinus, P., Shane, P.A., 2011. Sequential eruption of alkaline and sub-alkaline magmas from a small monogenetic volcano in the Auckland Volcanic Field, New Zealand. From Maars to Scoria Cones: The Enigma of Monogenetic Volcanic Fields 201 (1), 126–142. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.017>.

Neri, M., Ferrera, E., Giannanco, S., Currenti, G., Cirrincione, R., Patané, G., Zanon, V., 2016. Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. Sci. Rep. 6, 24581.

Obson, E.L., Allen, R.M., 2005. The deterministic nature of earthquake rupture. Nature 438 (7065), 212–215. <https://doi.org/10.1038/nature04214>.

Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G., Barrancos, J., et al., 2012. Helium emission at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. Chem. Geol. 312–313, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.018>.

Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., et al., 2013. Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. Geology 41 (5), 539–542. <https://doi.org/10.1130/G34027.1>.

Padrón, E., Pérez, N.M., Rodríguez, F., Melián, G., Hernández, P.A., Sumino, H., et al., 2015. Dynamics of diffuse carbon dioxide emissions from Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. Bull. Volcanol. 77 (4), 28. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0914-2>.

Paonita, A., Caracausi, A., Iacono-Marziano, G., Martelli, M., Rizzo, A., 2012. Geochemical evidence for mixing between fluids exsolved at different depths in the magmatic system of Mt Etna (Italy). Geochim. Cosmochim. Acta 84, 380–394. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.01.028>.

Peltier, A., Staudacher, T., Bachélery, P., 2007. Constraints on magma transfers and structures involved in the 2003 activity at Piton de la Fournaise from displacement data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (B3), 112. <https://doi.org/10.1029/2006JB004379>.

Pérez, N.M., 1994. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He isotopic ratios in volcanic-hydrothermal discharges from the Canary Islands, Spain: implications on the origin of the volcanic activity. Mineral. Mag. 58, 709–710. <https://doi.org/10.1180/minmag.1994.58A.2.107>.

Pérez-López, R., Legrand, D., Gardutiu-Monroy, V.H., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., 2011. Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). From Maars to Scoria Cones: The Enigma of Monogenetic Volcanic Fields 201 (1), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.006>.

Phillipson, G., Sobradete, R., Gottsmann, J., 2013. Global volcanic unrest in the 21st century: an analysis of the first decade. J. Volcanol. Geotherm. Res. 264, 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.08.004>.

Pineau, F., Javoy, M., 1983. Carbon isotopes and concentrations in mid-oceanic ridge basalts. Earth Planet. Sci. Lett. 62 (2), 239–257. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90087-4).

Rizzo, A.L., Barberi, F., Carapezza, M.L., Di Piazza, A., Francalanci, L., Sortino, F., D'Alessandro, W., 2015. New mafic magma refilling a quiescent volcano: evidence from He-Ne-Ar isotopes during the 2011–2012 unrest at Santorini, Greece. Geochim. Geophys. Geosyst. 16 (3), 798–814. <https://doi.org/10.1002/2014GC005653>.

Romero Ruiz, C., 1989. Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. Tesis Universidad de La Laguna, La Laguna.

Rubin, A.M., 1995. Propagation of magma-filled cracks. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 23 (1), 287–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.23.050195.001443>.

Rubio, J.M.B., 1950. Contribución al estudio de la erupción del volcán del Nambroque o San Juan (Isla de La Palma): 24 de junio-4 de agosto de 1949. Instituto Geográfico y Catastral.

Sainz-Maza Aparicio, S., Armoso Sampedro, J., Gonzalez Montesinos, F., Martí Moist, J., 2014. Volcanic signatures in time gravity variations during the volcanic unrest on El Hierro (Canary Islands). Journal of Geophysical Research: Solid Earth 119 (6), 5029–5051. <https://doi.org/10.1002/2013JB010795>.

Sakamoto, M., Sano, Y., Wakita, H., 1992. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratio distribution in and around the Hakone volcano. Geochim. J. 26 (4), 189–195. <https://doi.org/10.12343/geochimj.26.189>.

Sano, Y., Wakita, H., 1985. Geographical distribution of <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 90 (B10), 8729–8741. <https://doi.org/10.1029/B090101p08729>.

Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Rouilleau, E., Pinti, D.L., Fischer, T.P., 2015. Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. Sci. Rep. 5, 13069. <https://doi.org/10.1038/srep13069>.

Saruwatari, K., Kameda, J., Tanaka, H., 2004. Generation of hydrogen ions and hydrogen gas in quartz-water crushing experiments: an example of chemical processes in active faults. Phys. Chem. Miner. 31 (3), 176–182. <https://doi.org/10.1007/s00269-004-0382-2>.

Scarlato, P., Turcime, P., Mollo, S., Soligo, M., Castelluccio, M., 2013. Contrasting radon background levels in volcanic settings: clues from <sup>222</sup>Rn activity concentrations measured during long-term deformation experiments. Bull. Volcanol. 75 (9), 751. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0751-0>.

Schmincke, H.-J., Klügel, A., Hansteen, T.H., Hoernle, K., & van den Bogaard, P. (1998). Samples from the Jurassic ocean crust beneath Gran Canaria, La Palma and Lanzarote (Canary Islands). Earth Planet. Sci. Lett., 163(1–4), 343–360. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00168-x](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00168-x).

Schultz, R., Stern, V., Gu, Y.J., 2014. An investigation of seismicity clustered near the Cordell Field, west central Alberta, and its relation to a nearby disposal well. Journal of

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006	Código de verificación: ZW6hFmEg	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		06/10/2020 19:57:29

227 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40

- Geophysical Research: Solid Earth 119 (4), 3410–3423. <https://doi.org/10.1002/2019JB016836>
- Shi, Y., Bolt, B.A., 1982. The standard error of the magnitude-frequency b value. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72 (5), 1677–1687.
- Smith, J.O., 2007. Introduction to Digital Filters: With Audio Applications. W3K. Retrieved from: <https://books.google.es/books?id=pC1KQJASHEC>
- Staudigel, H., Schmincke, H.-U., 1984. The Pliocene seamount series of La Palma/Canary Islands. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89 (B13), 11195–11215. <https://doi.org/10.1029/JB089B13p11195>
- Stephens, K.J., Ebmeier, S.K., Young, N.K., Biggs, J., 2017. Transient deformation associated with explosive eruption measured at Masaya volcano (Nicaragua) using Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Volcano Geodesy: Recent Developments and Future Challenges* 344, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.014>
- Sweeney, C., Newberger, T., Munro, D. R., & others. (2016). A multi-decade record of high-quality  $^{14}\text{C}$  data in version 3 of the Surface Ocean  $\text{CO}_2$  Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data*, 8(2).
- Taisne, B., Tait, S., Jaupart, C., 2011. Conditions for the arrest of a vertical propagating dyke. *Bull. Volcanol.* 73 (2), 191–204. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0440-1>
- Tedesco, D., 1997. Systematic variations in the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio and carbon of fumarolic fluids from active volcanic areas in Italy: evidence for radiogenic  $^3\text{He}$  and crustal carbon addition by the subducting African plate? *Earth Planet. Sci. Lett.* 151 (3), 255–269. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)81852-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)81852-3)
- Troll, V.R., Carracedo, J.C., 2016. Chapter 3 - the Geology of La Palma. *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier, pp. 101–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809663-5.00003-7>
- Tuccimei, P., Mollo, S., Vinciguerra, S., Castelluccio, M., Soligo, M., 2010. Radon and thoron emission from lithophysae-rich tuff under increasing deformation: an experimental study. *Geophys. Res. Lett.* 37 (5). <https://doi.org/10.1029/2009GL042134>
- Waldhauser, F., 2001. hypoDD—A Program to Compute Double-difference Hypocenter Locations (hypoDD Version 1.0 – 03/2001).
- Waldhauser, F., Ellsworth, W.L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90 (6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Ward, S.N., Day, S., 2001. Cumbre Vieja Volcano—potential collapse and tsunamis at La Palma, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.* 28 (17), 3397–3400. <https://doi.org/10.1029/2001GL013110>
- Wawrzyniak, P., Zlotnicki, J., Sailhac, P., Marquis, G., 2017. Resistivity variations related to the large March 9, 1998 eruption at La Fournaise volcano inferred by continuous MT monitoring. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 347, 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.09.011>
- White, R., McCausland, W., 2016. Volcano-tectonic earthquakes: a new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 309, 139–155. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020>
- Zeebe, R.E., Wolf-Gladrow, D., 2001.  $\text{CO}_2$  in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes. Gulf Professional Publishing.
- Zhang, J., Quay, P.D., Wilbur, D.O., 1995. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of  $\text{CO}_2$ . *Geochim. Cosmochim. Acta* 59 (1), 107–114. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)01550-D](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)01550-D)
- Zhou, Y., Zhou, S., Zhuang, J., 2018. A test on methods for MC estimation based on earthquake catalog. *Earth and Planetary Physics* 2 (2), 150–162. <https://doi.org/10.26464/ep2018015>
- Zlotnicki, J., 2015. Dynamics of volcanic eruptions: understanding electric signatures for activity monitoring. *Compt. Rendus Geosci.* 347 (3), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.crite.2015.05.002>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2904006

Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 06/10/2020 12:15:48

Ana Isabel Jiménez Abizanda  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 12:59:14

José Manuel García Fraga  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 13:23:57

Vicente Soler Javaloyes  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

06/10/2020 19:57:29

228 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.

Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2916373

Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2904006 Código de verificación: ZW6hFmeG

Firmado por: PEDRO ANTONIO TORRES GONZALEZ UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 06/10/2020 12:15:48
Ana Isabel Jiménez Abizanda UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 12:59:14
José Manuel García Fraga UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 13:23:57
Vicente Soler Javaloyes UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	06/10/2020 19:57:29

229 / 229

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.  
*Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>*

Identificador del documento: 2916373 Código de verificación: 1MCyi070

Firmado por: María de las Maravillas Aguiar Aguiar  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 09/10/2020 05:03:40