

Tesi doctoral presentada per En/Na

**Adelina GEYER TRAYER**

amb el títol

**"Dynamics and structural evolution of collapse calderas: A comparison between field evidence, analogue and mathematical models"**

per a l'obtenció del títol de Doctor/a en

GEOLOGIA

Barcelona, 28 de marc del 2007.

Facultat de Geologia  
Departament de Geodinàmica i Geofísica



UNIVERSITAT DE BARCELONA



---

# INDEX

<b>RESUMEN</b>	<b>i-xxx</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxxi-xxxiii</b>
<b>LIST OF FIGURES</b>	<b>xxxv-l</b>
<b>LIST OF TABLES</b>	<b>li-lij</b>
<b>PART I: INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
I.1 <u>VOLCANOES AND COLLAPSE CALDERAS</u>	<u>1</u>
I.2 <u>OBJECTIVES</u>	<u>20</u>
I.3 <u>METHODOLOGY</u>	<u>21</u>
I.4 <u>STRUCTURE</u>	<u>23</u>
<b>PART II: FIELD STUDIES</b>	<b>25</b>
II.1 <u>INTRODUCTION</u>	<u>25</u>
II.2 <u>FIELD DATA AND CALDERAS</u>	<u>27</u>
II.3 <u>STATE OF THE ART</u>	<u>44</u>
II.4 <u>WORLDWIDE CALDERA INFORMATION</u>	<u>80</u>
II.5 <u>FIELD DATA ANALYSIS</u>	<u>99</u>
II.6 <u>SUMMARY AND CONCLUSIONS</u>	<u>214</u>
<b>PART III: ANALOGUE MODELS</b>	<b>217</b>
III.1 <u>INTRODUCTION</u>	<u>217</u>
III.2 <u>STATE OF THE ART</u>	<u>218</u>
III.3 <u>NEW ANALOGUE MODELS</u>	<u>236</u>
III.4 <u>SUMMARY AND CONCLUSIONS</u>	<u>296</u>
<b>PART IV: MATHEMATICAL MODELS</b>	<b>299</b>
IV.1 <u>INTRODUCTION</u>	<u>299</u>

---

IV.2 <u>PRESSURE EVOLUTION DURING CALDERA-FORMING ERUPTIONS</u>	301
IV.3 <u>CONDITIONS FOR RING FAULT INITIATION</u>	305
IV.4 <u>STATE OF THE ART</u>	306
IV.5 <u>NEW MATHEMATICAL MODELS</u>	324
IV.6 <u>SUMMARY AND CONCLUSIONS</u>	375
<b>PART V: DISCUSSION-----</b>	<b>379</b>
V.1 <u>COMPARISON BETWEEN FIELD EVIDENCE, ANALOGUE AND MATHEMATICAL MODELS</u>	379
V.2 <u>GENETIC CLASSIFICATION OF COLLAPSE CALDERAS</u>	384
<b>PART VI: SUMMARY AND CONCLUSIONS-----</b>	<b>393</b>
<b>PART VII: REFERENCES-----</b>	<b>398</b>
VII.1 <u>REFERENCES CITED IN THE TEXT</u>	398
VII.2 <u>REFERENCES INCLUDED IN THE CCDB</u>	422

**ANNEXES**

**RESUMEN**  
**&**  
**ABSTRACT**



# RESUMEN

## 1 INTRODUCCIÓN

- 1.1 Los volcanes y las calderas de colapso
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodología
- 1.4 Estructura

## 2 ESTUDIOS DE CAMPO

- 2.1 Introducción y objetivos
- 2.2 Los estudios de campo y las calderas de colapso
- 2.3 Trabajos y resultados previos
- 2.4 Información sobre las calderas del mundo: la CCDB
- 2.5 Resultados: análisis de los estudios de campo
- 2.6 Restricciones de los estudios de campo
- 2.7 Resumen y conclusiones

## 3 MODELOS EXPERIMENTALES

- 3.1 Introducción
- 3.2 Trabajos y resultados previos
- 3.3 Nuevos modelos experimentales
  - 3.3.1 Introducción y objetivos
  - 3.3.2 Metodología experimental
  - 3.3.3 Resultados
  - 3.3.4 Conclusiones

## 4 MODELOS MATEMÁTICOS

- 4.1 Introducción
- 4.2 Trabajos y resultados previos
- 4.3 Restricciones de los modelos matemáticos
- 4.4 Nuevos modelos matemáticos
  - 4.4.1 Objetivos
  - 4.4.2 Metodología
  - 4.4.3 Resultados
  - 4.4.4 Conclusiones

## 5 DISCUSIÓN

## 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

## 7 TRABAJOS FUTUROS

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Los volcanes y las calderas de colapso

Las erupciones volcánicas representan uno de los peligros naturales más devastadores de nuestro planeta, ya que, a parte del carácter violento del proceso, una gran mayoría de las zonas volcánicas están actualmente densamente pobladas. De hecho, millones de personas en el mundo aprovechan los suelos fértiles y la energía geotérmica que les proporcionan las zonas volcánicas. Paradójicamente, los volcanes ofrecen, por una parte, condiciones favorables para el asentamiento de zonas habitadas, por otra, su poder devastador tiene la capacidad de destruir vidas y bienes materiales de manera prácticamente instantánea y, en la mayoría de los casos, impredecible. Las erupciones volcánicas no tienen únicamente consecuencias a pequeña escala, éstas son capaces también de alterar el clima de la Tierra, entre otros muchos efectos.

Todos y cada uno de estos aspectos puede volverse aún más dramático si una erupción viene acompañada de la formación de una caldera de colapso. Estas estructuras, depresiones (de morfología circular o elíptica) de dimensiones que abarcan desde las centenas de metros hasta las decenas de kilómetros, se originan principalmente durante erupciones ignimbríticas, adquiriendo de esta manera un gran poder destructivo.

En consecuencia, la demanda de predicciones fiables y cuantificables de erupciones volcánicas, sobre las cuales se basan los mapas de peligrosidad y las actuaciones durante crisis volcánicas, crece día a día. Por ello, el estudio de erupciones volcánicas y la formación de calderas de colapso se está volviendo cada vez más sistemático, cuantitativo y riguroso.

Durante los últimos decenios los vulcanólogos han recurrido a diversas fuentes de información para llegar a comprender a fondo los procesos volcánicos, culminación de largos y complejos procesos físicos y geológicos. Los estudiosos del tema obtienen los datos de diferentes sectores de la ciencia. De entre los datos de campo, los modelos (matemáticos, teóricos o experimentales), la monitorización y la teledetección, tratan de encontrar aquellos métodos que les puedan dar más información sobre los mecanismos que rigen un sistema volcánico.

Más concretamente, el estudio de las calderas de colapso se remonta más de 50 años atrás, existiendo, aún en nuestros días, bastantes interrogantes sobre los procesos que las originan y las estructuras geológicas que las caracterizan. Entre los métodos utilizados para su estudio se encuentran, a parte de los datos de campo y geofísica, los modelos experimentales y los teóricos/matemáticos. Los modelos experimentales (analógicos y a escala), adecuados para la “visualización” y una primera comprensión del mecanismo de formación de las calderas, se generan a partir de las propias observaciones de campo y estudios geofísicos. Sobre sus resultados se elaboran los teóricos/matemáticos que describen el fenómeno mediante el lenguaje matemático y pueden llegar a cuantificar algunas de las variables involucradas en el proceso físico objeto de estudio.

A pesar de arduos esfuerzos por parte de la comunidad científica y tras de décadas de investigación, aún existen puntos oscuros respecto a la comprensión del funcionamiento de las calderas de colapso y los parámetros que influyen en su mecanismo de formación, de ahí la motivación para realizar el trabajo que se expone a continuación.

## 1.2 Objetivos

Este trabajo tiene diversos objetivos. En primer lugar, se pretende recopilar la mayor cantidad de información disponible sobre las calderas de colapso proveniente de estudios de campo, modelos experimentales y modelos matemáticos. Llegados a este punto, la intención es avanzar en cada una de las disciplinas comentadas anteriormente, reinterpretando y complementando los datos ya existentes (para el caso de los datos de campo), elaborando nuevos experimentos (modelos analógicos) o cálculos (modelos matemáticos). Los siguientes objetivos son, por una parte, realizar una comparación entre los resultados obtenidos a través del trabajo de campo, los modelos experimentales y los modelos matemáticos, y definir, por otra, las posibles restricciones presentes en los diferentes métodos. La intención final es extraer nuevas conclusiones sobre la dinámica y la evolución estructural de las calderas de colapso y proponer una nueva clasificación genética de las calderas de colapso, formulada a partir de toda la información recogida y obtenida en este trabajo. Además, gracias a la recopilación de estudios de campo, se pretende crear una base de datos sobre las calderas del mundo más conocidas y estudiadas. Para una mejor difusión, esta base de datos se pondrá a disposición de la comunidad científica de forma gratuita, mejorando de esta forma la comunicación entre



investigadores y el intercambio de datos e información. En muchas ocasiones la falta de comunicación entre los diferentes grupos de la comunidad científica afecta al avance del conocimiento sobre la materia, en este caso la volcanología. Por ello, cada cierto tiempo es necesario llevar a cabo una recopilación de la información ya existente para poder redefinir el punto de partida de trabajos futuros.

### 1.3 Metodología

En este estudio, como parte de la estrategia de trabajo se incluye:

**Una revisión bibliográfica de los datos de campo:** Búsqueda y análisis de bibliografía relacionada con estudios de campo sobre calderas volcánicas.

**La elaboración de modelos experimentales (análogos):** Los modelos experimentales son esenciales para la comprensión de la mecánica de formación de las calderas de colapso desde un punto de vista cualitativo. Estos modelos son una herramienta necesaria y básica para identificar, visualizar, e investigar procesos que no se pueden observar directamente en la naturaleza. En muchas ocasiones nos proporcionan las pautas a seguir con los modelos matemáticos.

**La elaboración de modelos matemáticos:** Los modelos matemáticos, contrariamente a los experimentales, son útiles para cuantificar las variables que participan en el proceso físico que se estudia. Este tipo de modelos es adecuado para la realización de estudios paramétricos aunque un inapropiado conocimiento del sistema (e.g. tipo de reología, geometría, etc.) puede llevarnos a extraer conclusiones completamente erróneas.

### 1.4 Estructura

Este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

**1. Introducción:** Introducción general sobre los volcanes y más concretamente las calderas de colapso. Breve explicación de la importancia del estudio de estas estructuras así como los objetivos, metodología y estructura de este trabajo.

**2. Estudios de campo:** Capítulo enfocado a la recopilación de trabajos de campo relacionados con las calderas de colapso y la consecuente elaboración de la base de datos sobre calderas volcánicas. Reinterpretación de los datos existentes y definición de los tipos de calderas existentes según la información de campo analizada.

**3. Modelos analógicos:** Los objetivos de esta sección del trabajo son definir el estado del arte de los modelos analógicos enfocados al estudio de las calderas de colapso y la realización de experimentos adicionales para obtener nuevos resultados y poder compararlos con los ya existentes.

**4. Modelos matemáticos:** Los objetivos de este capítulo son definir el estado del arte de los modelos matemáticos enfocados al estudio de las calderas de colapso y la realización de cálculos adicionales para obtener nuevos resultados y poder compararlos con los ya existentes.

**5. Discusión:** A lo largo de esta sección se pretende extraer información de la dinámica y la evolución estructural de las calderas de colapso a partir de la comparación de los resultados obtenidos en los tres últimos apartados. El objetivo final es la definición de la clasificación genética de las calderas de colapso.

**6. Conclusiones y resumen:** Resumen de los resultados obtenidos y conclusiones.

**7. Referencias:** Lista de la bibliografía citada en el trabajo y consultada durante la elaboración de la base de datos de calderas.

## 2. ESTUDIOS DE CAMPO

### 2.1 Introducción y objetivos

Los estudios de campo constituyen uno de los caminos más importantes para investigar y entender los procesos volcánicos. La reconstrucción de erupciones caldéricas pasadas y su comparación con los fenómenos que acontecen en la actualidad, es una poderosa herramienta para entender el mecanismo de formación de las calderas de colapso.

Los productos volcánicos se incorporan al registro geológico y constituyen la base para la reconstrucción de erupciones pasadas. Evidentemente, los trabajos de

campo sobre depósitos volcánicos se centran en el estudio de la estratigrafía, litología y sedimentología así como en reconstruir la correspondiente secuencia eruptiva. Adicionalmente un detallado estudio de campo y petrológico nos puede permitir averiguar las condiciones preeruptivas del magma y las causas más probables que desencadenaron la erupción. Por último, los datos de campo son fundamentales para comprobar y calibrar los modelos experimentales y matemáticos.

El mayor problema de los datos de campo es que procesos posteruptivos pueden transformar los depósitos originales e incorporar en el registro estratigráfico materiales provenientes de otras erupciones.

En esta sección, se ofrece primero un resumen de las diferentes observaciones de campo que aportan información sobre los factores que controlan los procesos volcánicos, especialmente los colapsos de caldera. El segundo objetivo es la elaboración de la base de datos de calderas de colapso acoplada a un sistema de información geográfica (SIG). Una vez desarrollada la base de datos, se pretende analizar los datos que en ella se incluyen con la intención de definir ciertos criterios de clasificación basados en los datos de campo.

## **2.2 Los estudios de campo y las calderas de colapso**

Los estudios de campo encargados del estudio de las calderas volcánicas están especialmente enfocados al estudio de los aspectos estructurales (p.ej. dimensión y morfología de la caldera, características tectónicas regionales y locales) y de los depósitos volcánicos (p.ej. estratigrafía, sedimentología, litología, petrología y geoquímica). Ciertamente, un estudio riguroso de los productos y las estructuras generadas durante el episodio de formación de la caldera puede proporcionar la información necesaria para determinar la actividad volcánica previa al colapso de caldera y puede ayudar, a su vez, a entender las posibles causas que desencadenaron el colapso y como éste ocurrió.

La obtención de los datos de campo se puede llevar a cabo mediante estudios de topografía y análisis de imagen satélite, geofísica estructural, trabajo de campo y de laboratorio, y a través del estudio de los depósitos hidrotermales, geotermales o de menas metálicas. Las observaciones directas de procesos volcánicos son escasas y sólo se pueden realizar en circunstancias muy especiales, pudiendo observar únicamente las partes superficiales del complejo proceso. Existen limitaciones logísticas añadidas,

puesto que sólo es posible recolectar datos en aquellos volcanes o complejos volcánicos accesibles, de los que se pueda saber con antelación el momento de la erupción o en los cuales se tenga establecido un observatorio. Además, los datos de campo no están exentos de importantes limitaciones y restricciones. La erosión y la actividad volcánica y tectónica posteriores al colapso de la caldera pueden modificar el registro de la erupción caldérica, modificando el volumen del material depositado, la forma de la estructura resultante del colapso, etc. Como resultado de estas restricciones, las observaciones basadas en la observación directa de campo suelen ser incompletas y con un cierto grado de incertidumbre. Es necesario tener en cuenta estas limitaciones a la hora de interpretar los resultados.

### 2.3 Trabajos y resultados previos

Las calderas volcánicas han sido objeto de estudio de muchos trabajos durante las últimas décadas. Los resultados más representativos obtenidos mediante el análisis de datos de campo se pueden resumir tal como sigue.

**“Calderas and their origin”:** En 1941, Williams presentó con el trabajo “Calderas and their origin” un impresionante y revelador análisis de los diferentes aspectos que conciernen a las calderas de colapso. En resumen, los resultados y conclusiones más importantes del trabajo de Williams (1941) revelan que, aún existiendo diversas teorías sobre el mecanismo de formación de las calderas de colapso, la más probable es aquella la cual asume que el colapso de caldera se da por el vaciado de magma de un reservorio magmático. El colapso ocurre como resultado de una subsidencia controlada mediante fracturas anulares. En volcanes de tipo escudo, la evacuación de magma desde la cámara se da a través de la salida de lava a lo largo de fisuras en el flanco del edificio. Por lo contrario, usualmente en volcanes compuestos la salida de magma se da a través de una violenta y rápida explosión de material piroclástico. Los factores que favorecen el colapso son: cámaras magmáticas lenticulares, techos de cámara delgados suficientemente impermeables para permitir la acumulación de grandes cantidades de gas y presión, puntos de debilidad en el techo de la cámara (p.ej. fracturación previa, alteración, etc.), etc.

**Estructura de una caldera de colapso:** Los estudios de campo permiten definir los siguientes elementos morfológicos característicos de los colapsos de caldera (Lipman, 1997): límite topográfico (eskarpe que separa la zona que ha subsidido del área volcánica no perturbada), pared topográfica interna (eskarpe de falla originado durante la subsidencia o posibles cicatrices

de derrumbamientos postcaldera), fallas limítrofes (fallas anulares que delimitan el colapso), suelo de la caldera (parte horizontal, no deformada, situada en la parte central interna del colapso), relleno de la caldera (material expulsado durante y después de la erupción caldérica gracias a la subsidencia del techo de la cámara).

**Clasificación morfológica:** Las calderas volcánicas se clasifican según el tipo de subsidencia. Se pueden distinguir cuatro familias principales de mecanismos de formación de calderas volcánicas (Lipman, 1997): tipo pistón (subside un bloque coherente a lo largo de una o varias fallas circulares bien definidas), tipo “trap-door” o trampilla (subside un bloque bordeada por fallas circulares parciales y con un segmento colgante), caóticas o “piecemeal” (el pistón se fractura en bloques más pequeños durante el colapso), tipo “downsag” o hundimiento (la subsidencia se acomoda a través de una flexión) y tipo “funnel” o embudo (calderas semejantes a un embudo, rellenas de brechas).

**Clasificación composicional y de estilo eruptivo:** Los primeros intentos para subdividir y clasificar los colapsos de caldera intentaban distinguirlos según el estilo eruptivo y la composición del magma en ciertos volcanes representativo (Williams, 1941; Macdonald, 1972; Williams and McBirney, 1979): Krakatoa, Katmai, Valles, Hawaiian, Galápagos, Masaya y Atitlán.

**Clasificación composicional:** Cole et al. (2004) propusieron una clasificación composicional aún admitiendo que no existe una relación directa entre la composición y el tipo de colapso de caldera: basálticas, andesíticas-dacíticas, peralcalinas y riolíticas.

**Modelos de evolución de calderas resurgentes:** Utilizando la caldera Valles como modelo y argumentado con otros ejemplos naturales, Smith y Bailey (1968) reconocieron los siguientes estadios en la evolución de una caldera resurgente: tumescencia regional y generación de fallas anulares, erupciones caldéricas, colapso de caldera, volcanismo y sedimentación prerresurgencia, domo resurgente, volcanismo a través de las fracturas anulares y actividad de solfataras y fuentes termales.

**Clasificación de la actividad volcánica postcaldera:** Tras la recopilación bibliográfica de más de 160 calderas cuaternarias Walker (1984) clasificó la actividad volcánica postcaldera según la distribución de los centros eruptivos posteriores a la caldera en: tipo C (un único centro emisor en posición central), tipo L (varios centros eruptivos alineados), tipo M (un centro eruptivo en el

margen de la caldera), tipo R (varios centros eruptivos a lo largo del margen de la caldera) y tipo S (varios centros eruptivos dispersos en el interior de la caldera).

**Estudios de subsidencia en minas aplicados a procesos de colapso de caldera:** Branney (1995) y posteriormente Roche et al. (2000) aplicaron los resultados obtenidos en los estudios de subsidencia en minas a procesos de colapso de caldera. Las observaciones más relevantes indican que la relación entre la geometría de la cámara magmática y su profundidad controla la estructura y tipo de colapso. Los estudios de minería definen **R** como el cociente entre el espesor del material por encima de la cavidad y el ancho ésta. Se establecen tres tipos de subsidencia dependiendo del valor de **R**: subcrítica ( $R > 0,7$ ), crítica ( $R = 0,7$ ) y supercrítica ( $R < 0,7$ ).

#### 2.4 Información sobre las calderas del mundo: la CCDB

La base de datos CCDB (The Collapse Caldera DataBase) elaborada en este trabajo parte de otros compendios sobre estudios de campo de calderas de colapso: el trabajo de Newhall y Dzurisin (1981) y la información proporcionada por la IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior) y el Smithsonian Museum of Natural History. A parte, se han consultado alrededor de 200 referencias especializadas en las diferentes calderas. La base de datos contiene información sobre 283 calderas distribuidas por todo el mundo. Una vez elaborada la CCDB en Microsoft Access<sup>®</sup>, se ha creado un formulario para facilitar la entrada de nuevas calderas en la base de datos o la modificación de la información existente. Adicionalmente, hemos vinculado la CCDB con un sistema de información geográfica el cual nos permite representar las calderas en un mapa del mundo y estudiar la distribución espacial de éstas según sus características (p.ej. edad, estructura, etc.)

La CCDB está dividida en diferentes secciones que recogen diferentes tipos de información. Las secciones son: **propiedades de la caldera, de los depósitos, y de la cámara magmática, actividad precaldera, actividad postcaldera, tectónica de placa, regional y local, y referencias consultadas.**

Una vez terminada la primera versión de la base de datos, se está creando una página web en la cual, tras previo registro, los usuarios puedan descargar la base de datos de forma gratuita, sugerir modificaciones, actualización de los datos, etc.

## 2.5 Resultados: análisis de los estudios de campo

Una vez finalizada la CCDB, se ha analizado la información que ésta contiene para estudiar las características más importantes de las calderas de colapso tales como la edad, la dimensión, la estructura, etc., y la posible relación existente entre ellas. Para ello de entre todas los atributos recogidos en la CCDB hemos escogido aquellos más significativos en el estudio de las calderas de colapso: **localización geográfica de la caldera, edad, dimensiones, geometría del colapso, volumen de los depósitos asociados a la erupción, composición y volumen del magma extruido, tipo de corteza terrestre asociada, contexto tectónico, existencia de fallas regionales, condición de las estructuras locales, tipo de edificio precaldérico, desencadenante de la erupción y tipo de actividad posterior al colapso.** Para poder llevar a cabo el análisis se ha creado la denominada *CCDB DATA TABLE*. Cada una de las columnas y filas principales contiene información sobre los diferentes atributos seleccionados y en total podemos ver la interacción existente entre cada uno de ellos (p.ej. cuantas calderas hay de una cierta edad con una determinada composición de magma).

Finalmente, tras analizar la información contenida en la *CCDB DATA TABLE* y combinando los diferentes resultados, obtenemos que desde el punto de vista de la información obtenida en el campo distinguimos dos tipos de calderas:

**Tipo A:** Las calderas incluidas en este grupo son estructuras de tipo pistón o *trap-door* de dimensiones considerables (diámetro > 25 km). Los depósitos asociados son primordialmente calco-alcalino félsicos, principalmente riolíticos o dacíticos. Las erupciones caldéricas de este tipo involucran importantes volúmenes de magma (>100 km<sup>3</sup>). Normalmente, estas erupciones caldéricas comienzan directamente con la formación de fracturas anulares y la erupción asociada, y en general, no existe información sobre la posible existencia de edificios volcánicos previos tales como volcanes compuestos o no hay evidencias de fases eruptivas previas a la formación de estas fallas. En muchos casos, estas calderas se forman en áreas de corteza continental (gruesa o delgada) y ocasionalmente, en corteza transicional muy evolucionada y gruesa. Los contextos tectónicos más comunes son las zonas de subducción de tipo Chileno y las áreas de *rifting* continental.

**Tipo B:** Las calderas incluidas en este grupo tienden a ser más pequeñas que las de tipo A (diámetro < 25 km). Aunque los depósitos asociados más comunes son los calco-alcálico félsicos, también se pueden encontrar ejemplos calco-alcálico máficos o alcalinos. Las erupciones caldéricas de este tipo pueden involucrar importantes volúmenes de magma pero normalmente éstos son menores que aquellos correspondientes a las erupciones tipo A. En la mayoría de los casos, existe información sobre la existencia de edificios volcánicos previos tales como volcanes compuestos: estratovolcanes y estratoconos. Normalmente, estas erupciones caldéricas comienzan con una fase eruptiva previa a la formación de fracturas anulares. Estas calderas pueden formarse en cualquier tipo de corteza y contexto tectónico.

Además de estos resultados, también se ha averiguado que ciertas zonas como América del Norte, poseen a lo largo de las últimas decenas de millones de años una evolución estructural y magmática tal, que aparentemente favorece la generación de calderas de colapso.

## 2.6 Restricciones de los estudios de campo

Evidentemente, tanto los datos de campo como el análisis correspondiente llevan implícito una serie de restricciones y limitaciones que pueden afectar a las conclusiones del trabajo. Básicamente éstas se pueden agrupar en: restricciones que afectan la preservación de las estructuras y materiales durante la erupción caldérica (p.ej. erosión, reabajamiento, actividad volcánica y procesos de deformación postcaldera, etc.), restricciones que distorsionan la interpretación de los depósitos estudiados (p.ej. correlaciones erróneas), errores en los trabajos revisados (p.ej. datos antiguos o malinterpretados, errores tipográficos) y errores que se comenten al introducir la información dentro de la base de datos o al diseñar la *CCDB DATA TABLE* donde se reclasifica y se interpreta la información incluida en la base de datos.

## 2.7 Resumen y conclusiones

Hemos visto en esta sección que los estudios de campo constituyen uno de los caminos más importantes para investigar y entender las erupciones caldéricas y su correspondiente señal en el registro geológica. La elaboración de la base de datos de



calderas acoplada a un sistema de información geográfica (SIG) nos ha permitido recopilar y analizar los datos de campo de un gran número de referencias bibliográficas. Esto nos ha dado la posibilidad de definir dos grandes familias de colapso de calderas según las evidencias y observaciones de campo. Los resultados obtenidos junto con los datos de los modelos analógicos y matemáticos servirán para la definición de la clasificación genética de las calderas de colapso. Además, hemos podido observar que aparentemente existen ciertas zonas (América del Norte) con una evolución estructural y magmática tal, que favorece la generación de calderas de colapso.

### **3. MODELOS EXPERIMENTALES**

#### **3.1 Introducción**

En nuestros días, no se concibe el estudio de los volcanes sin recurrir a los modelos, ya sean experimentales, teóricos o matemáticos. Los vulcanólogos están limitados, de lo contrario, a la mera interpretación de las observaciones de campo, monitorización y teledetección. Los modelos analógicos son necesarios, incluso en nuestros días, donde el desarrollo de modelos matemáticos avanza muy deprisa permitiendo simular procesos bastante complejos. Los modelos analógicos son un primer paso para el estudio de los mecanismos de formación de las calderas de colapso. Recordemos que son base para otros estudios y posiblemente puedan abrir o enseñar caminos desconocidos hasta el momento, llegando a reflejar aspectos que no se habían tenido en cuenta o que no se habían considerado importantes o relevantes, demostrando su importancia en el fenómeno. De hecho los experimentos son útiles e indispensables para: explorar nuevos fenómenos y aportar observaciones de procesos desconocidos, verificar hipótesis y modelos teóricos y validar modelos computacionales o también denominados matemáticos.

Los modelos analógicos se pueden clasificar según en tipo de material que utilizan en (Mader et al., 2004): modelos naturales (iguales a aquellos que se pretende modelar) o modelos analógicos (pretenden simular con un factor de escala determinado el comportamiento de los naturales). Este último tipo se aplica para simular procesos a gran escala. Existe el pequeño inconveniente que los materiales análogos capturan muy

raramente todo el rango de comportamiento físico-químico del sistema natural. Es posible que algunas características cruciales para el proceso que se está estudiando sean diferentes a las reales alterando de esta forma el resultado a escala e impidiendo la comparación del modelo analógico con la realidad (Mader et al., 2004).

### 3.2 Trabajos y resultados previos

La aplicación de modelos analógicos al estudio de la formación de calderas de colapso empezó a mediados del siglo pasado aunque empezaron a ser más relevantes a partir de los años 80. Los modelos analógicos realizados durante estos los últimos 30 años se pueden agrupar de la siguiente forma según el tema que abordan: (1) **modelos de colapso puro** (colapso de calderas como consecuencia de una caída de presión dentro de la cámara) (Komuro, 1987; Martí et al., 1994; Roche et al., 2000; Acocella et al., 2000; Acocella et al., 2001a; Acocella et al., 2001b; Roche and Druitt, 2001; Walter and Troll, 2001; Kennedy et al., 2004; Lavallée et al., 2004); (2) **modelos de colapso en domos** (colapso de caldera en la cima de un domo debido a un exceso de presión dentro de la cámara) (Komuro et al., 1984; Martí et al., 1994; Acocella et al., 2000; Walter and Troll, 2001); (3) **modelos de colapso durante ciclos múltiples de deformación** (desarrollo de la superposición de domos y colapsos de caldera) (Martí et al., 1994; Acocella et al., 2000; Walter and Troll, 2001); (4) **modelos de colapso en la presencia de topografía** (Walter and Troll, 2001; Lavallée et al., 2004) y (5) **modelos de colapso bajo un régimen tectónico específico** (Acocella et al., 2004; Holohan et al., 2005).

En resumen, en el proceso de formación de una caldera de colapso puro sin presencia de una topografía previa se generan diversas clases de fracturas: (a) **fracturas superficiales extensivas** (alrededor de la zona de colapso propiamente dicha); (b) **fallas inversas de morfología acampanada** (se forman en los primeros estadios del colapso, a partir del techo de la cámara magmática análoga) y (c) **fallas circulares verticales o subverticales** (limitan la parte central del colapso). La evolución temporal del colapso sigue el siguiente orden: (1) **formación de las fracturas extensivas superficiales**; (2) **comienzo de la subsidencia con un hundimiento tipo “downsag”** (en el caso de  $R$  bajas,  $R < 0,7 - 0,85$ ); (3) **formación de las fallas verticales circulares que rompen el material por encima de la cámara, generando un pistón que subsidie a medida que se va vaciando la cámara**. Finalmente, el tipo de colapso (pistón, “funnel”, etc.) y sus dimensiones dependen primordialmente de la relación existente entre la profundidad y

dimensiones de la cámara magmática (**R**). Además, la geometría del colapso está en relación con la geometría de la cámara magmática, la tectónica regional y local, y las propiedades de la roca encajante.

Evidentemente, los modelos analógicos acarrearán también una serie de restricciones y limitaciones que pueden afectar a los resultados obtenidos. Éstas se pueden deber tanto a los materiales utilizados para simular la cámara magmática o la roca encajante, como al propio diseño experimental. Las restricciones más destacables serían: (a) **la cámara magmática análoga y/o el material de la roca encajante se deforman de manera irreal**; (b) **desde la cámara magmática es imposible inyectar diques en la roca encajante** (aún siendo este proceso de extrema importancia en los ciclos eruptivos); (c) **la roca encajante es homogénea** (aunque las variaciones composicionales y mecánicas pueden ser relevantes) y (d) **no se consideran los efectos térmicos de la cámara sobre la roca** (aunque pueden introducir variaciones en el comportamiento mecánico de la roca encajante).

### 3.3 Nuevos modelos experimentales

#### 3.3.1 Introducción y objetivos

Todos los experimentos realizados en este trabajo están enfocados al estudio de la formación de calderas de colapso originadas en ausencia de estructuras de deformación previas, cualesquiera que sea su origen. El primer objetivo de estos nuevos modelos analógicos es reproducir algunos de los trabajos publicados anteriormente para comparar los resultados y verificar así el buen funcionamiento de nuestro dispositivo experimental y definir sus restricciones. Además, para poder comprobar hasta que punto el diseño de éstos influye en los resultados obtenidos, se han utilizado diferentes dispositivos experimentales. Estos nuevos experimentos introducen alguna variable no consideradas hasta el momento como heterogeneidades en la composición de la roca encajante. Por otra parte, se ha definido experimentalmente la relación entre los diferentes estadios que definen un colapso de caldera y el volumen de magma evacuado de la cámara. Esta relación crucial en términos de peligro volcánico, ya que puede llegar a predecir si una erupción es susceptible a evolucionar hacia un colapso de caldera pero, hasta ahora, sólo se había estudiado de manera teórica (Druitt and Sparks, 1984; Bower

and Woods, 1997; Martí et al., 2000; Roche and Druitt, 2001). En este trabajo se describe la evolución de las fracturas y fallas tanto en superficie como en profundidad y se correlaciona los diferentes estadios con la cantidad de “magma” (material análogo) extraído de la cámara hasta ese momento. Se pretende estimar experimentalmente la fracción de magma  $f$  (parámetro introducido por Roche and Druitt, 2001) que se ha de evacuar de la cámara para crear las diferentes familias de fracturas y fallas que llevan a la subsidencia de la caldera. Los resultados obtenidos se compararán con estimaciones numéricas publicadas anteriormente.

### *3.3.2. Metodología experimental*

Para la realización de este trabajo se han utilizado dos dispositivos experimentales cuya principal diferencia reside en el tipo de cámara magmática análoga utilizada. En el primero, se introduce dentro de un tanque un globo de látex lleno de agua (cámara magmática análoga). Éste se conecta a un tubo, que se extiende más allá de las paredes del tanque y por el cual se procederá al vaciado del agua causando así el colapso del material por encima de la cámara. En el segundo dispositivo, la cámara magmática se simula mediante silicona. Ésta se coloca en un reservorio cilíndrico conectado a un tubo de vaciado que permanece abierto durante el experimento. El peso de la roca encajante análoga sobre la silicona causa que esta última fluya por el tubo y se genere el colapso. En ambos, el tanque se rellena de arena de cuarzo (análogo de la roca encajante). Para poder apreciar las estructuras que se forman durante el colapso de la caldera, el relleno del tanque se hace con material análogo de diferentes colores simulando la estratificación. En algunos experimentos, se han levantado en superficie unos relieves de material análogo, los cuales pretenden representar edificios volcánicos. Después de cada experimento el modelo se cubre con arena para preservar la depresión y otras estructuras superficiales. Acto seguido se satura con agua y se secciona de manera seriada. En ciertos experimentos, el globo se sitúa tocando el cristal del tanque, de tal manera que se puede ver la formación de las diferentes fallas a medida que se vacía el globo, algo crucial para la descripción de la evolución de las fracturas y fallas, y su correlación con la cantidad de “magma” (material análogo) extraído de la cámara. A lo largo de los experimentos se va midiendo el volumen de agua extraído del globo para poder calcular la fracción de éste respecto al volumen de agua inicial dentro del globo.

El diseño de un modelo analógico debe cumplir los principios de escalado discutidos por Hubbert (1937) y Sanford (1959). El sistema natural y el experimental deben de estar escalados: (1) **geoméricamente** (las longitudes del modelo real y las correspondientes en el analógico son proporcionales y los ángulos correspondientes sean iguales); (2) **cinemáticamente** (el tiempo necesario para un determinado cambio en el modelo real es proporcional al tiempo requerido por el análogo para realizar el mismo cambio) y (3) **dinamicamente** (a cada una de las fuerzas  $F_i$  del modelo real le corresponde en el modelo analógico, una fuerza  $F_j$  de igual orientación a  $F_i$  y con una relación de magnitudes:  $F_j / F_i = \phi$ , igual para cualquier par de fuerzas  $F_i$  y  $F_j$ ). Los métodos de escalados se realizan mediante la relación entre parámetros físicos o los números Pi (Teorema Pi de Buckingham) (Middleton & Wilcock, 1994).

### 3.3.3 Resultados

En este apartado se resumen las observaciones realizadas con aquellos modelos analógicos que consideran el globo lleno de agua como cámara magmática análoga.

**Modelos con globo sin topografía:** En planta, la estructura del colapso está dividida en tres sectores. Desde el interior al exterior de la caldera: (a) **una zona interna circular sin deformar**; (b) **una zona anular de material inclinado hacia el interior de la caldera** y (c) **una zona anular horizontal con fracturas extensivas**. La evolución temporal de colapso se caracteriza por los siguientes estadios: (1) **la formación de fracturas circulares superficiales en la zona extensiva**; (2) **el desarrollo de una depresión mediante un hundimiento flexural tipo “downsag”**; (3) **el crecimiento de las fallas inversas acampanadas que nacen del techo de la cámara magmática y se extienden hacia la superficie**; (4) **la propagación de las fracturas extensivas superficiales en profundidad y su evolución a fallas normales** y (5) **el comienzo del colapso en forma de pistón guiado por las fallas verticales**.

**Modelos con globo con topografía:** El colapso es de tipo pistón delimitado por fallas normales circulares prácticamente verticales y fallas inversas. También se forman fallas inversas acampanadas que no alcanzan la superficie. Subsida un cilindro de base equivalente a la proyección en planta de la cámara magmática análoga y con el extremo superficial cónico. A medida que evoluciona el colapso, se crean fallas inversas acampanadas. Éstas se generan en el techo de la cámara y avanzan hacia la superficie. Primero, se propagan prácticamente verticales y

luego disminuyen la inclinación llegando a alcanzar 50-60° o, en casos aislados, menos. Debido a este esquema de formación de fallas, cuando éstas llegan a la superficie, las paredes del elemento que comienza a colapsar en ese momento son verticales y circulares. La heterogeneidad de la topografía hace aumentar el número de fallas que delimitan el pistón y la relación entre ellas es más compleja.

**Relación entre la evolución estructural del colapso y la cantidad de “magma” extraído de la cámara magmática:** Para cada experimento se mide la fracción de agua (magma)  $f$  que se ha de evacuar para formar las primeras fracturas en superficie, la generación de las fallas acampanadas y su llegada a la superficie y finalmente, la subsidencia a través de las fallas verticales anulares. Los resultados muestran que los valores de  $f$  dependen de  $R$ . Para que se generen el mismo tipo de estructuras (p.ej. las fallas acampanadas), en experimentos de  $R$  alta se ha de extraer una fracción de magma mayor ( $f$  alto) que en los experimentos de  $R$  baja. La dependencia  $f(R)$  se adapta a una función logarítmica del tipo  $f(R) = A \ln(R) + B$ , donde  $A$  y  $B$  son constantes. Adicionalmente, definimos  $f_{CRIT}$  como la fracción de magma crítica a partir de la cual se desencadena el colapso de caldera *sensu stricto*, es decir, la subsidencia se da a lo largo de las fallas anulares verticales. Los valores de  $f_{CRIT}$  pueden variar desde el 20% para cámaras con  $R$  baja ( $R = 0.34$ ) hasta el 70% para  $R$  más elevadas ( $R = 2.34$ ). Si en un mismo gráfico se representan algunos ejemplos naturales y los resultados experimentales, se observa que los valores para  $f_{CRIT}$  de los ejemplos naturales se adaptan mejor a la curva experimental cuanto menor es  $R$ . Las discrepancias entre los datos experimentales y los valores naturales pueden residir en las restricciones implícitas en los datos de campo necesarios para calcular los valores de  $f_{CRIT}$  de las calderas reales. Los resultados obtenidos experimentalmente coinciden con los obtenidos en los modelos teóricos/matemáticos previamente publicados.

Aparte de los resultados anteriores, los modelos de colapso con globo nos permiten estudiar el patrón de subsidencia durante el proceso de colapso y la dependencia de las dimensiones del colapso con  $R$ .

Al realizar los modelos analógicos de colapso de caldera con un reservorio de silicona como cámara magmática análoga, observamos aproximadamente los mismos resultados que con los modelos con globo. Las principales diferencias pueden resumirse en los siguientes puntos:

**Diferencias estructurales:** El número de fracturas y fallas involucradas en el colapso es generalmente mayor en los modelos de globo que en los de silicón. Además, en los modelos de silicón la zona externa con fracturas extensivas superficiales es prácticamente inexistente, el diámetro del pistón en superficie corresponde con el límite del colapso. Por el contrario, en los modelos de globo, éste último es mucho mayor que el primero debido a la existencia de la amplia zona anular extensiva alrededor del límite del pistón.

**Diferencias en la evolución temporal:** En los modelos de silicón las primeras fallas que se generan son las que controlarán posteriormente el colapso. Por el contrario, en los modelos de globo, previamente a las fallas anulares verticales las cuales delimitan el pistón que subside, se genera un gran número de fracturas extensivas en superficie y fallas acampanadas en profundidad.

**Influencia de  $R$  en las dimensiones del colapso en superficie:** Mientras que para los modelos de globo el diámetro del límite del colapso se incrementa de forma logarítmica con  $R$ , en los experimentos de silicón disminuye siguiendo una tendencia lineal. En los modelos de globo, independientemente de  $R$ , el diámetro del pistón es similar al del globo. Por lo contrario, en los modelos de silicón, el diámetro del pistón depende de  $R$  y es siempre menor al diámetro del reservorio de silicón (excepto para valores muy bajos de  $R$ ). Lo mismo ocurre con el diámetro de la zona interna sin deformar.

#### *3.3.4 Conclusiones*

Los modelos analógicos son un primer paso para el estudio de los mecanismos de formación de las calderas de colapso. Aunque son muchos los factores naturales que no se pueden controlar ni simular analógicamente y que, seguramente, tienen influencia en los procesos volcánicos, estos modelos permiten visualizar a grandes rasgos fenómenos naturales. Como conclusiones a este capítulo se puede apuntar que el proceso de colapso de caldera y la morfología final de ésta dependen de la forma y dimensiones de la cámara magmática, el valor de la relación entre el ancho y la profundidad de la cámara magmática ( $R$ ), el material de la roca de caja, la existencia de relieves en superficie, así como la composición y morfología de éstos, la duración del colapso, la tectónica regional y local, y los procesos de deformación previos. A parte, el método experimental posee ciertas limitaciones que deben estudiarse a fondo antes de interpretar

geológicamente los resultados obtenidos. En general, todos los modelos experimentales obtienen resultados similares, aunque aparecen ligeras diferencias debido a los materiales análogos utilizados y el diseño del dispositivo experimental.

## 4. MODELOS MATEMÁTICOS

### 4.1 Introducción y objetivos

El uso de modelos teóricos/matemáticos basados tanto en la termodinámica como en la mecánica de fluidos y de roca han ido ganando en importancia durante las últimas décadas. Un modelo teórico es una abstracción simplificada de cierto fenómeno natural y se acepta cuando es posible reproducir tanto resultados analíticos como experimentales. Estos modelos se caracterizan por una serie de ecuaciones de gobierno que describen el problema físico de una manera matemática. En los casos en los que las expresiones matemáticas son demasiado complejas y la solución analítica es inviable, es necesario recurrir a los modelos matemáticos ejecutados en ordenadores. Una simulación numérica de un modelo teórico es simplemente la solución bajo ciertas condiciones iniciales y de contorno para las ecuaciones de gobierno.

### 4.2 Trabajos y resultados previos

Los modelos teóricos aplicados a la volcanología se pueden dividir en dos grupos principales: **modelos preeruptivos** (simulan procesos que ocurren dentro de la cámara, el campo de esfuerzos y los puntos de ruptura de la cámara, etc. ) y **eruptivos** (procesos que se dan en la cámara, el conducto y el exterior durante la erupción). Los modelos preeruptivos se pueden subdividir a su vez en aquellos que consideran la cámara magmática como un sistema abierto (el aumento de presión en la cámara se produce por la sobresaturación de volátiles durante el proceso de enfriamiento) o cerrado (el aumento de presión en la cámara se debe a una inyección de nuevo magma dentro del reservorio). Por otra parte, los modelos de colapso de caldera elaborados durante las últimas décadas pueden clasificarse en: **modelos enfocados al estudio de las variaciones de presión dentro de la cámara magmática** (Druitt and Sparks, 1984; Bower and Woods, 1997; 1998; Martí et al. 2000; Roche and Druitt, 2001); **modelos que determinan las**



**condiciones de esfuerzo para la formación de fallas anulares** (Komuro, 1984; Chery et al., 1991; Gudmundsson et al., 1997; Gudmundsson, 1998; Roche and Druitt, 2001; Folch and Martí, 2004) y **modelos que predicen la localización de fallas utilizando reologías no elásticas** (Burov and Guillou-Frottier, 1999; Guillou-Frottier et al., 2000; Gray and Monaghan, 2004). Los resultados más importantes obtenidos mediante estos modelos matemáticos aplicados al estudio de las calderas de colapso son:

**Modelos de evolución de la presión durante una erupción caldérica:** Los sistemas volcánicos pasan por una serie de etapas antes de la erupción y el colapso de caldera. Estos cambios están controlados principalmente por la presión dentro del sistema magmático o por factores externos que también modifican el equilibrio de presiones del sistema. Durante un ciclo completo de una erupción caldérica, la presión en el interior de la cámara  $P_M$  (presión magmática) y la presión litostática  $P_L$  controlan la evolución de la erupción. Previamente a la erupción, existe un estado de equilibrio en el sistema ( $P_M = P_L$ ), pero desencadenantes externos e internos pueden alterarlo generando un incremento de la presión dentro de la cámara ( $P_M \uparrow$ ). Se dice entonces que la cámara se encuentra con sobrepresión:  $P_M - P_L > 0 (+ \Delta P)$ . Una sobrepresión en la cámara magmática puede inducir a la formación un domo que, en estados avanzados de su desarrollo, puede generar colapsos donde las tensiones en superficie sean mayores. Este tipo de colapsos es de origen mecánico y no tiene implicaciones volcánicas. La roca de caja puede soportar esta sobrepresión siempre y cuando  $P_M < P_L + \Delta P_{START}$ , donde  $\Delta P_{START}$  es la sobrepresión necesaria para romper la roca por tensión, es decir, la resistencia de la roca a romper por tensión. Si la sobrepresión de la cámara es lo suficientemente grande para romper la roca encajante ( $P_M > P_L + \Delta P_{START}$ ) el sistema puede evolucionar de tres maneras distintas. En presencia de un *doming* regional se puede dar una erupción a través de fallas anulares induciéndose un colapso de caldera. Una vez abierto el sistema y mientras perdura el colapso de caldera,  $P_M$  disminuye y la subsidencia se prolonga hasta que el sistema se reequilibra. En otras circunstancias, la sobrepresión puede llevar a la inyección de diques desde la cámara magmática hasta la roca encajante y si estos alcanzan la superficie, a una erupción volcánica. En ambas situaciones,  $P_M$  disminuye. Para el caso de una erupción, el sistema puede responder de tres maneras distintas: la roca encajante se comporta perfectamente elástica y acomoda instantáneamente la disminución de la presión reequilibrando el sistema ( $P_M = P_L$ ); la roca encajante se comporta de forma rígida ( $P_L(t) = \text{constante}$ ) o  $P_L$  disminuye más lentamente que  $P_M$  (la roca encajante tarda más en acomodarse a la disminución de  $P_M$  que esta última en

disminuir). En los dos últimos casos, la roca no puede sobrellevar los cambios de presión de una manera tan efectiva como en el caso elástico y en consecuencia, la diferencia entre  $P_L$  y  $P_M$  aumenta con el tiempo ( $P_M - P_L (t)$ ). Se dice que la cámara está con un déficit de presión cuando  $P_M - P_L < 0 (-\Delta P)$ . Si  $P_M \leq P_L - \Delta P_{\text{COLL}}$ , donde  $\Delta P_{\text{COLL}}$  es el déficit de presión necesario para inducir el colapso se inicia el colapso de caldera. Concluyendo, desde un punto de vista teórico y según la evolución de la presión dentro de la cámara durante el ciclo eruptivo, se puede decir que existen dos tipos de calderas de colapso: las generadas por un déficit o un exceso de presión dentro de la cámara.

**Condiciones para la formación de fallas anulares:** La formación de fallas anulares normales subverticales se da cuando se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones: (1) **el valor mínimo de  $\sigma_3$  (valor máximo del esfuerzo extensivo) se da en superficie;** (2) **el valor máximo de  $\sigma_1 - \sigma_3$  (esfuerzo de cizalla) se da en los márgenes de la cámara magmática y** (3) **el valor de tensión máxima está localizado en superficie a una distancia radial aproximadamente igual a la proyección en planta de la cámara magmática.**

#### 4.3 Restricciones de los modelos matemáticos

Las restricciones implícitas en los modelos teóricos/matemáticos se pueden resumir en los siguientes puntos: (a) **considerar la roca de caja homogénea** (las heterogeneidades litológicas y las discontinuidades estructurales pueden afectar al campo de esfuerzos y la propagación de fracturas), (b) **los modelos tiene desacoplada la dinámica de fluidos y la mecánica de rocas** (los procesos que ocurren dentro de la cámara pueden afectar al conducto o la roca encajante o viceversa); (c) **no se puede simular la inyección de diques** (pueden reequilibrar la presión del sistema magmático); (d) **no hay presencia de edificios volcánicos ni de estructuras regional previas** (pueden afectar al campo de esfuerzos y la formación de fracturas); (e) **sólo se pueden simular fracturas de carácter extensivo** (en calderas de colapso una parte importante de las fracturas son por cizalla) y (f) **la reología de la roca considerada** (reologías demasiado simples pueden inducir a errores).

## 4.4 Nuevos modelos matemáticos

### 4.4.1 Objetivos

Los modelos matemáticos expuestos en este trabajo tienen diversos objetivos. Por una parte, intentar reproducir numéricamente algunos de los modelos experimentales expuestos en el capítulo anterior para poder comparar los resultados obtenidos usando ambas metodologías y averiguar de esta manera posibles restricciones no detectadas hasta el momento. El segundo objetivo es reproducir algunos de los modelos realizados por Folch y Martí (2004) para estudiar hasta que punto influye la geometría escogida para el cálculo (geometría axisimétrica o tridimensional) en los resultados y las interpretaciones geológicas. A parte de los modelos especialmente diseñados para el estudio de las calderas de colapso, este trabajo muestra un ejemplo de la posible aplicación de otros modelos diseñados para investigaciones sin conexión directa con la volcanología. Hemos escogido para ello un modelo que estudia la influencia del crecimiento de la zona de daño de una falla en el desplazamiento de ésta. Puesto que durante los colapsos de caldera pueden reactivarse algunas de las fallas ya existentes en la zona, consideramos que este tipo de modelos puede tener una aplicación directa al estudio de la evolución estructural de las calderas de colapso.

### 4.4.2 Metodología

Para cualquiera de los modelos matemáticos realizados en este trabajo se asume elasticidad lineal como modelo reológico para la roca encajante. Las soluciones numéricas se obtienen con el programa FEMFES, código que resuelve elasticidad mediante el método de elementos finitos (MEF) (Codina y Folch, 2004, Folch y Martí, 2004).

**Reproducción numérica de los modelos analógicos:** Para los modelos con globo se utiliza una geometría bidimensional y otra tridimensional. Se trata en ambos casos de un prisma (o un rectángulo en 2-D) que simula el tanque en el que se realizan los experimentos. La altura de este prisma es equivalente al espesor del volumen de arena por encima del globo. Las paredes rígidas del tanque se simulan fijando en el contorno del prisma desplazamiento nulo en cualquier dirección del espacio ( $u_x = u_y = 0$ ). La cámara magmática análoga se simula mediante un agujero elipsoidal dentro del prisma. Para los modelos con silicona, la geometría del problema es similar a

la anterior, pero asumimos simetría axial en vez de bidimensionalidad. Respecto a los parámetros elásticos asumimos que:  $E = 1.4 \text{ kPa}$ ,  $\nu = 0.25$  y  $\rho_s = 1270 \text{ kg/m}^3$ , donde  $E$  corresponde al módulo de Young,  $\nu$  al coeficiente de Poisson y  $\rho_s$  a la densidad de la arena de cuarzo. El desinflamiento del globo se simula mediante una disminución de presión distribuida de forma radial en todo el contorno de la cámara y en el caso de la silicona, el hundimiento de ésta en el tubo se representa simplemente aplicando la fuerza de la gravedad.

**Reproducción de los modelos realizados por Folch y Martí (2004):** Se considera dos posibles geometrías: una axisimétrica y otra tridimensional. En el caso de la axisimétrica, el dominio computacional es un rectángulo de dimensiones muy superiores a las de la cámara magmática. La cámara se simula como una oquedad en forma de media elipse situada en el eje de simetría del modelo. En tres dimensiones se trata de un prisma con un elipsoide de revolución en el centro. A los contornos del dominio se les asigna desplazamiento nulo. Para el caso de la reproducción de los modelos de Folch y Martí (2004):  $E = 45 \text{ GPa}$  y  $\nu = 0.25$ . Adicionalmente, asumimos que la roca rompe por tensión a  $15 \text{ MPa}$  ( $T_0 = 15 \text{ MPa}$ ) y por cizalla a  $50 \text{ MPa}$  ( $S_0 = 50 \text{ MPa}$ ). Para simular el vaciado de la cámara asumimos un déficit de presión de  $15 \text{ MPa}$  distribuidos radialmente en la pared de la cámara.

**Modelos de desplazamiento de falla:** Se ha escogido un dominio 2-D. Se trata de un rectángulo con un pequeño agujero alargado en el interior que simula el plano de falla. Alrededor de éste se han definido diferentes sectores a los cuales se les puede atribuir diferentes propiedades físicas en cada uno de los cálculos. En este tipo de modelos consideramos que la actividad de la falla va debilitando la zona alrededor de ésta creando el núcleo de la falla con un valor de  $E$  muy inferior al de la roca encajante. Diversos estudios demuestran (Berg, 2000; Braathen and Gabrielsen, 1998; Bruhn et al., 1994; Caine et al., 1995; Li et al., 1994; Shimada, 2000; Simmenes, 2002) que un incremento de la frecuencia de funcionamiento de la falla corresponde a una disminución de  $E$  en la dirección perpendicular a la dirección principal de fractura hacia la falla. Los resultados se han obtenido con el programa de elementos de contorno BEASY® (Beasy, 1991; Brebbia y Dominquez, 1992; <http://www.beasy.com>). Por una parte, a los contornos del modelo paralelos al plano de falla se les asigna desplazamiento nulo. En los contornos perpendiculares a la dirección de la falla se asigna una diferencia de  $5 \text{ MPa}$  (Scholz, 1990) para generar el campo de esfuerzos causante del deslizamiento de la falla. Para los diferentes modelos el valor de  $E$  de las diferentes unidades mecánicas alrededor de la falla va

decreciendo, la zona de daño alrededor de la falla se extiende. Los valores  $E$  disminuyen desde 35 GPa en el contacto con de la zona de daño con la roca encajante a 0.5 GPa tocando a la falla.

#### 4.4.3 Resultados

**Reproducción de los modelos analógicos de globo y silicona:** Aparentemente, no existe concordancia entre los resultados obtenidos experimentalmente con los modelos de globo y sus equivalentes numéricos. Sí aparecen algunas similitudes al reproducir numéricamente los modelos de silicona de  $R$  baja . Una posible explicación para este fenómeno es el uso de la elasticidad para simular la deformación de la arena de los modelos experimentales. Numéricamente, la elasticidad es capaz de simular únicamente los primeros estadios del colapso, cuando el techo de la cámara se flexiona. En el momento en el que aparece la primera fractura, asumir un comportamiento elástico para la roca encajante parece no tener sentido y así lo demuestran los resultados obtenidos. Los modelos realizados considerando elasticidad no son capaces de reproducir los resultados experimentales.

**Influencia de la geometría en los resultados:** Los resultados obtenidos dependen del tipo de geometría utilizada. Las aproximaciones bidimensionales ofrecen un tiempo de cálculo rápido y geometrías sencillas, pero los resultados obtenidos no siempre son representativos de la realidad. En medida de lo posible, es preferible utilizar una geometría tridimensional aunque se ha de prestar atención en el proceso de mallado. La comparación de los resultados obtenidos al reproducir los modelos de Folch y Martí (2004) con un dominio axisimétrico y uno tridimensional revela que, aunque a nivel teórico los resultados deberían ser equivalentes, a la práctica distan de serlo. Respecto a los desplazamientos, los resultados son similares aunque los valores discrepan cerca del eje de simetría del modelo axisimétrico. Por lo contrario, la distribución de los esfuerzos principales varía considerablemente de una geometría a otra. Esto tiene importantes consecuencias a la hora de interpretar los resultados, puesto que la posición del máximo extensivo en superficie puede cumplir (en el caso del modelo 3-D) la condición para la formación de fallas anulares o no (solución del modelo axisimétrico).

**Influencia del crecimiento de la zona de daño de una falla:** Para un conjunto de condiciones de contorno, la falla tiene desplazamiento máximo en el centro y mínimo en los extremos. Bajo el mismo campo de esfuerzos, el desplazamiento de la falla aumenta cuando se incrementa el espesor de la zona de daño. Estas observaciones se constatan con observaciones de

campo (Gudmundsson, 2000). Las implicaciones volcanológicas de estos resultados son directas. Es común observar en ciertas áreas volcánicas repetidos episodios de colapsos de caldera. En estos casos, las fallas que se formaron en la primera caldera se reactivan durante los colapsos posteriores. Si se aplican los resultados obtenidos se puede concluir que a medida que se reactivan estas fallas cada vez es menor el esfuerzo necesario para conseguir el mismo desplazamiento y en consecuencia, para producir el colapso de caldera. La roca encajante se debilita a lo largo de los diferentes eventos eruptivos ya sea por la continua reactivación de las fallas como por los procesos de alteración. Por consiguiente, existe la posibilidad que éstos fenómenos puedan variar las condiciones mecánicas para el siguiente colapso de caldera.

#### *4.4.4 Conclusiones*

Los modelos teóricos/matemáticos son útiles para cuantificar variables, semicuantificar las condiciones para la formación de fracturas o fallas y determinar cuando el colapso de caldera tendrá lugar. Por lo contrario, no nos pueden informar de cómo va a ser el complejo proceso de colapso. Desde un punto de vista teórico basándose en la evolución de la presión dentro de la cámara, es posible distinguir un grupo de calderas formadas en condiciones de sobrepresión y otras debido a una caída de la presión magmática por debajo de la litostática. Los resultados obtenidos en los modelos matemáticos dependen de una serie de restricciones que pueden condicionar la calidad de los resultados obtenidos: el diseño del modelo (geometría, dimensión, etc.), las condiciones de contorno, las propiedades mecánicas de los materiales, la reología, etc. son algunas de ellas.

## **5. DISCUSIÓN**

Recordemos que el objetivo último de este trabajo es la propuesta de una clasificación genética de las calderas de colapso y una descripción de la dinámica y evolución estructural de los tipos de caldera definidos. Según estos trabajos de campo se ha obtenido una división de las calderas de colapso en dos grandes grupos que hemos denominado: tipo A y B. Además, los modelos experimentales indican que es posible obtener un colapso de caldera mediante la descompresión de la cámara magmática análoga o en la parte superior de un domo debido al ascenso o inflamamiento de la cámara magmática análoga. Por otra parte, en la sección correspondiente a los modelos

matemáticos, hemos presentado un resumen de la evolución de la presión dentro de una cámara magmática y las diferentes condiciones de presión que pueden llevar al inicio de un proceso de colapso de caldera. Se distinguen dos situaciones diferentes: colapsos por sobrepresión o por descompresión. Combinando todas estas observaciones se llega a la siguiente clasificación genética:

- **Calderas tipo “Cordillera”:** Las calderas incluidas en este grupo corresponden a las definidas como “Tipo A” según los datos de campo y a las generadas por sobrepresión de acuerdo con los datos numéricos. Estas estructuras se forman por exceso de presión dentro de una cámara magmática de tipo *sill* en presencia de un campo regional de esfuerzos extensivo y un *doming* o *underplating* a gran escala. Cuando se supera la resistencia de la roca a romper por tensión, se generan fracturas circulares en la superficie a una distancia radial aproximadamente igual a la proyección en planta de la cámara magmática. Estas fracturas se propagan en profundidad de manera vertical o subvertical. La erupción de caldera comienza debido a la descompresión de la cámara magmática a través de estas fracturas. En general, no existen evidencias ni de edificios previos a la caldera (p.ej. volcanes compuestos o escudo) ni de fases eruptivas (p.ej. energéticas fases plinianas o erupciones máficas de baja energía) previos a la formación de las fallas circulares. Este tipo de erupciones caldéricas tienden a generar grandes estructuras de colapso (diámetro > 25 km) de tipo pistón o *trap-door*, normalmente asociadas a importantes volúmenes de magma (>100 km<sup>3</sup>). Comúnmente, los depósitos asociados son de composición calco-alcalina, más concretamente: riolítica o dacítica. Este tipo de calderas se da en áreas de corteza continental gruesa o fina y ocasionalmente, en corteza transicional gruesa y muy evolucionada. Además están asociadas a zonas de subducción de tipo chileno o a zonas de rift continental y más localmente, a estructuras extensivas o compuestas de cizalla y extensión.

- **Calderas tipo “Volcán compuesto”:** Las calderas incluidas en este grupo corresponden a las definidas como “Tipo B” según los datos de campo y a las generadas por descompresión de acuerdo con los datos numéricos. Estas calderas son el proceso culminante de longevos volcanes compuestos. Se dan en la cima de estos edificios los cuales han estado sometidos normalmente a varios periodos de inflamamiento y desinflamamiento de la cámara magmática, así como a varias erupciones. La erupción de caldera comienza con una sobrepresión dentro de la cámara magmática que supera la resistencia de la roca a romper por tensión y lleva a la inyección de diques en la roca encajante y finalmente a la erupción. Consecuentemente, estos colapsos

presentan evidencias de fases eruptivas previas a la formación de las fallas circulares. La evacuación de magma durante estas fases eruptivas produce una disminución de la presión dentro de la cámara magmática. El colapso empieza una vez superada la resistencia de la roca encajante a la rotura y subsidencia. Nótese que los diferentes periodos de deformación y los diversos ciclos eruptivos pueden debilitar la roca encajante y por consiguiente, la diferencia de presión necesaria para desencadenar un colapso de caldera puede disminuir. Evidentemente, las evidencias en el campo concernientes a este tipo de colapso calderas muestran la existencia de edificios volcánicos previos a la erupción caldérica, particularmente volcanes compuestos tales como estratovolcanes o estratoconos. Aparentemente, la evolución de estas calderas de colapso coincide con las observaciones realizadas mediante los modelos analógicos cuando se considera una descompresión de la cámara magmática análoga como el desencadenante del colapso de caldera. Éste comienza por una flexión del material por encima de la cámara y la generación en superficie de fracturas extensivas anulares. Posteriormente, se generan fallas inversas acampanadas en la parte superior de la cámara magmática que se propagan hacia la superficie. Se ha de tener en cuenta que esta es una observación experimental, algunas observaciones en el campo indican que las fracturas generadas desde la cámara magmática acaban convirtiéndose en diques y no llegan a evolucionar a fallas (Gudmundsson et al., 1997; Gudmundsson, 1998). El colapso de la caldera continua, por una parte, con la migración hacia zonas más profundas de algunas de las fracturas anulares extensivas las cuales se convierten en fallas verticales o subverticales y por otra, con la llegada de las fallas acampanadas a la superficie. Las calderas que se incluyen en este grupo suelen ser más pequeñas que las de tipo “Cordillera” (diámetro < 25 km) y a pesar de que pueden estar vinculadas a grandes volúmenes de magma no son tan voluminosas como las otras. Aunque los depósitos son mayoritariamente de composición félsica calco-alcalina, también es posible encontrar ejemplares de tipo máfico calco-alcalino o alcalinos. Las calderas de tipo “Volcán compuesto” pueden ocurrir en cualquier tipo de corteza y contexto tectónica y bajo la presencia de diferentes estructuras tectónicas (p.e. compresivas, extensivas, cizalla), aunque las más comunes son las extensivas.

Evidentemente, la evolución de la presión dentro de la cámara magmática durante todo el ciclo de colapso de caldera es diferente para cada uno de los tipos de calderas considerados. Se parte de la base que la erupción tiene lugar debido a un exceso de presión dentro de la cámara magmática (independientemente del origen de éste). Una vez empezada la erupción, la presión dentro de la cámara disminuye reequilibrando el sistema. Mientras que para las calderas tipo “Cordillera” es el propio proceso de



colapso el que reequilibra el sistema, en las tipo “Volcán compuesto” es la fase eruptiva previa. En el caso de las calderas tipo “Cordillera”, el colapso continúa hasta que la presión dentro de la cámara es igual que la litostática, momento en el cual el sistema ha vuelto al equilibrio. Durante las erupciones susceptibles a originar un colapso de caldera de tipo “Volcán compuesto”, una vez comenzada la erupción, la presión dentro de la cámara disminuye situándose por debajo de la litostática. Cuando la diferencia de presión es suficiente se origina el colapso de la caldera. Una vez iniciado el colapso, la presión dentro de la cámara se reequilibra rápidamente alcanzando la presión litostática. En ambos casos, la presión magmática puede volver a incrementar con el tiempo si comienza un nuevo ciclo volcánico. Nótese que dependiendo del sistema considerado, puede variar el tiempo que éste necesita para volver a recuperar dentro de la cámara la sobrepresión necesaria para desencadenar una erupción.

## 6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En combinación con los estudios de campo tradicionales, el desarrollo de los modelos experimentales y teóricos/matemáticos nos ha permitido determinar las causas y mecanismos que controlan las calderas de colapso. Nos proporcionan una idea clara de cuando y como se dará el colapso y como será la estructura resultante. De esta forma, hemos podido identificar y cuantificar aquellos factores que controlan la formación de calderas de colapso: dimensión, forma y profundidad de la cámara magmática, reología de la roca encajante, historia de deformación previa, existencia de topografía, tectónica regional, el campo de temperatura alrededor de la cámara magmática, y la composición y reología del magma.

La revisión de los datos de campo ha sido indispensable para comparar las observaciones realizadas con aquellos resultados obtenidos mediante los modelos experimentales y matemáticos. Además, la creación de la base de datos (CCDB) sobre calderas de colapso es un primer intento de establecer un nexo de unión entre los diferentes grupos científicos, iniciando un proceso de intercambio de datos e información para poder mejorar el conocimiento general sobre este tipo de estructuras volcánicas. A través del análisis de los datos incluidos en la CCDB se ha podido deducir la existencia de dos tipos bien diferenciados de calderas de colapso. Estos resultados coinciden con aquellos presentados en los trabajos clásicos sobre calderas de colapso publicados a mediados del siglo XX.

Los resultados obtenidos experimentalmente nos han permitido estudiar cualitativa- y semicuantitativamente la evolución estructural de un colapso de caldera y sugerir aquellos factores más relevantes durante el proceso. Hemos podido verificar que la formación de calderas de colapso se ve claramente influenciada por múltiples aspectos como la tectónica regional, la geometría del sistema, las propiedades físicas y mecánicas del magma y la roca encajante, las discontinuidades estructurales, la historia de deformación previa, etc. Los modelos experimentales nos han permitido estudiar mediante análisis semicuantitativos: la relación entre la evolución estructural del colapso y la cantidad de “magma” extraído de la cámara magmática, el patrón estructural de subsidencia y la influencia de R en las dimensiones del colapso en superficie. Las diferencias en los resultados se deben al diseño del experimento y los materiales utilizados para simular la roca encajante y la cámara magmática.

Los modelos matemáticos nos han permitido: cuantificar algunos de los parámetros involucrados en el proceso de colapso, definir las condiciones teóricas para la formación de fallas anulares y describir la evolución de la presión del sistema volcánico durante una erupción de colapso de caldera. Adicionalmente, la reproducción numérica de ciertos experimentos ofrece la posibilidad de establecer ciertas similitudes y discrepancias existentes entre ambas metodologías, así como algunas de las restricciones más importantes de sendos tipos de modelos. Además, hemos visto como es posible aplicar al estudio de las calderas de colapso, resultados procedentes de otras disciplinas, como por ejemplo, el estudio del desplazamiento de fallas. Desde un punto de vista teórico/matemático, las calderas de colapso pueden dividirse en dos grandes grupos dependiendo si se inician por un exceso o un déficit de presión dentro de la cámara magmática. Si se combina esta clasificación con la propuesta por los datos de campo y las observaciones realizadas con los modelos experimentales se puede establecer una clasificación genética de las calderas de colapso. Distinguimos dos grandes grupos, las calderas tipo “Cordillera” y las de tipo “Volcán compuesto”.

Este trabajo demuestra que se obtienen mejores resultados cuando se combinan diferentes tipos de información y no se consideran únicamente los resultados obtenidos con una sola metodología. De forma independiente, las tres fuentes de información utilizadas (los datos de campo, y los modelos experimentales y teóricos/matemáticos) llevan implícitos una larga serie de restricciones que, en algunos casos, sólo se pueden detectar combinando los resultados procedentes de las tres metodologías. El objetivo final de este trabajo es aclarar que para una mejor comprensión de la dinámica y evolución

---

estructural de las calderas de colapso es necesario establecer crear una interacción entre las diferentes disciplinas disponibles. Sólo así se puede valorar la relevancia de cada una de las técnicas en el momento de responder a las cuestiones más destacadas del estudio de las calderas de colapso.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

Este estudio pretende servir de base para trabajos futuros puesto que ofrece un resumen exhaustivo del estado del conocimiento de las calderas de colapso. Según lo observado a lo largo de la elaboración de este trabajo, aquellos trabajos enfocados al estudio de las calderas de colapso deben tener en cuenta la información proveniente de todas las metodologías existentes hasta el momento, así como las ventajas, restricciones y limitaciones de cada una de ellas. Algunos de los trabajos que se proponen tras la realización de esta Tesis incluyen, por una parte, mejorar los modelos matemáticos considerando reologías más representativas de la realidad, pudiendo introducir conceptos de mecánica de fractura y daño mecánico. Se sugiere también, estudiar la influencia de otros parámetros no considerados hasta el momento, como pudiera ser la historia eruptiva y de deformación del volcán expresada en términos de heterogeneidades composicionales y mecánicas, variaciones de las propiedades físicas de la roca de caja, etc. Consideramos que uno de los factores importantes es la escala temporal en la que actúan cada uno de los procesos que controlan o que tienen lugar durante los ciclos eruptivos, por lo que se propone estudiar el factor tiempo e introducirlo tanto en los modelos experimentales como matemáticos. En conclusión, aún queda un largo camino por recorrer en el estudio y la comprensión de las calderas de colapso, pero el avance tecnológico e informático ofrecen día a día nuevas vías de investigación han de tener en cuenta.

**LIST OF FIGURES  
&  
LIST OF TABLES**



# LIST OF FIGURES

## PART I: INTRODUCTION

**Fig. 1.1:** Spatial scale and relationship between those geological processes that influence and determine the nature of an eruption at surface. These processes are controlled by specific factors also represented in the sketch. **OC** Oceanic crust; **IC** Intermediate/transitional crust; **CC** Continental crust; **LIPs** Large igneous provinces; **MC** Magma chamber; **P<sub>M</sub>** Magmatic pressure; **RS** Rock resistance. \_\_\_\_\_ 2

**Fig. 1.2:** Sketch of the processes involved in eruptive cycles. (Modified from Marsh, 1989) **(Bottom and left)** Influence of the composition on the physical properties of magmas. More felsic magmas with high SiO<sub>2</sub> content are normally more viscous and may have higher water content. By contrast, magma density and temperature are lower. **(Bottom and right)** Mechanisms of magma ascent: through diapirs when the surrounding rocks are able to deform plastically and through dikes when the host rock is brittle. **(Top and left)** Triggering mechanism of explosive eruptions. Pressure inside the magma chamber (**P<sub>M</sub>**) may increase by an amount (**ΔP<sub>Mg</sub>**) due to volatile oversaturation or to intrusion of fresh magma (**ΔP<sub>Mi</sub>**). If the chamber pressure exceeds the lithostatic pressure (**P<sub>L</sub>**) plus the tensile strength of the surrounding rocks (**P<sub>R</sub>**), tensile vertical fractures may open allowing magma to escape from the chamber, sometimes reaching the surface to cause a volcanic eruption. (Modified from Martí and Folch, 2005) **(Top and right)** Mechanism of shallow magma chambers formation. Diapiric ascent is governed by the principle of buoyancy: the hot magma continues its ascent until it is less dense than the surrounding rock, when host rock and magma have the same density, the latter stops and begins to spread laterally and to accumulate. The magma ascent through fractures is controlled by pressure difference between the magmatic and the lithostatic pressure. Magma ascent continues until the magma pressure **P<sub>M</sub>** equals the lithostatic pressure **P<sub>L</sub>**. \_\_\_\_\_ 3

**Fig. 1.3:** **(A)** Summary of the different tectonic contexts where magma genesis and related volcanism takes place. **(B)** Summary of the differences between the Mariana-type and Chilean-type subduction modes based on the model of Uyeda (1982). Mariana-type subduction involves steeply descending plate, whereas in the Chilean-type the subduction angle is shallower. (Modified from Carey, 2005) \_\_\_\_\_ 4

**Fig. 1.4:** Some examples of calderas worldwide. **(A)** Crater Lake caldera, United States (Photograph: <http://www.geol.lsu.edu>). **(B)** Silali caldera, Kenya (Photograph: <http://www.volcano.si.edu>). **(C)** Katmai caldera, Alaska (Photograph: <http://www.skimountaineer.com>) \_\_\_\_\_ 8

**Fig. 1.5:** **(A)** Effects of the fine-grained ash generated during the eruption of Mt. Pinatubo in 1991 (Photograph: <http://faculty.weber.edu>) **(B)** The collapse structure at the summit part of the volcano generated during the climactic eruption (Photograph: <http://www.volcano.si.edu>). \_\_\_\_\_ 12

**Fig. 1.6:** The early summer date of the eruption (June 12-15) and the tropical location of the volcano (15° 07' N 120° 20' E), resulted in a rapid spread of the aerosol cloud around the Earth in about 3 months. **(A)** Aerosols content in the stratosphere before the eruption of Mt. Pinatubo on June 12-15, 1991. **(B)** Aerosols content just after the eruption and during the following month. The aerosol cloud has spread worldwide from the equator to both Tropics. **(C)** The aerosol cloud during the subsequent months. It has covered almost all the world. **(D)** Two years later a certain quantity of aerosols remain on the stratosphere. (Image: <http://weimages.gsfc.nasa.gov>) \_\_\_\_\_ 13

**Fig. 1.7:** Schematic diagram of the various volcanic inputs to the atmosphere and their interaction, fates, and radiative impact, including the formation of sulphuric acid aerosols. (Modified from Self, 2005 after McCormick et al., 1995 and Robock, 2000) \_\_\_\_\_ 13

**Fig. 1.8:** Conceptual view in space and time of caldera-related submarine magmatic-hydrothermal system. (Modified from Guillou-Frottier et al., 2000) **(A)** Asymmetric collapse of caldera exposes the underlying magmatic-hydrothermal system. Magma degasses while seawater flows into the system. **(B)** Cold seawater flows downwards through the faults while mineralising fluids heated by magma move up. Upflow and downflow generate hydrothermal convection cell controlled by the caldera structure. **(C)** Renewed magmatism causes resurgence and intrusion into roof rocks above magmatic reservoir uplifting the block rocks. \_\_\_\_\_ 16

## PART II: FIELD STUDIES

**Fig. 2.1:** Summary of the different techniques applied in the study of collapse calderas. \_\_\_\_\_ 28

**Fig. 2.2:** Summary of the structural aspects observable on the field in a regional and local scales \_\_\_\_\_ 31

**Fig. 2.3:** Examples of calderas on which different structural features are recognizable. **(A)** Montefiascone caldera is located at the intersection of regional structures. **(B)** Valles caldera, its elliptical morphology is possibly related to the regional field stress. The elongation of the caldera is parallel to the regional structures. **(C)** Silali caldera, the elongation of the caldera is perpendicular to the regional extensional structures, possibly due to pre-existing regional structures. **(D)** Fernandina a summit caldera with a great number of radial dike intrusions from the magma reservoir. **(E)** Phlegrean Fields, an example of nested caldera It has two ring faults structures clearly associated with two different caldera-forming events. **(F)** Batur caldera, the two rims are apparently of the same age. Collapse mechanism similar to analogue models results **(G)** Multiple concentric fractures at Biblis Patera, Mars extend outside the caldera wall. \_\_\_\_\_ 32

**Fig. 2.4:** Possible types of collapse mechanism inferred from the amount of extruded deposits associated with the caldera-forming eruption.  $S_p$  Subsidence at depth;  $S_s$  Subsidence at surface;  $V_c$  Volume of material in Dense Rock Equivalent (DRE);  $V_m$  Caldera volume \_\_\_\_\_ 34

**Fig.2.5:** Summary of the type of information provided by the study of the volcanic deposits applying different disciplines. \_\_\_\_\_ 36

**Fig. 2.6:** Isopach maps of tephra during the July–August 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. Stars in the newly formed caldera represent the eruption craters. Contours are in millimeters. (Nakada et al., 2005) \_\_\_\_\_ 38

**Fig. 2.7:** Schematic representation of the Kos Plateau Tuff eruption, the major caldera-forming eruption in the eastern Aegean Sea. Thanks to the analysis of the stratigraphic column it is possible to reconstruct the eruption dynamics and phases. **(A)** Initiation of the eruption with a phreatoplinian column from which widespread fine-grained fallout is deposited. **(B)** The eruptive activity fluctuates between wet phreatomagmatic to dry explosive style, causing column collapse and generating a pyroclastic density current. **(C)** Explosive activity transitional between wet and dry generates a pyroclastic density current. **(D)** Eruption intensity increases and dominantly dry explosive activity prevailed. **(E)** Climax of the eruption marked by the disintegration of the vent and conduit walls and ejection of a large amount of coarse vent- and conduit-derived lithic clasts. Multiple vents were possibly initiated at this stage. **(F)** Further decline in the eruption intensity is recorded by a fine-grained, lithic-poor stratified pyroclastic-density-current deposit. (Modified from Allen, 2001) \_\_\_\_\_ 39

**Fig. 2.8:** Stratigraphy, textural characteristics and components of the Kos Plateau Tuff (KPT), eastern Aegean Sea. **(Left)** Simplified stratigraphic profile of the units and subunits of the KPT on Kos, indicating eruption style and waxing and waning phases. **(A)** Textural characteristics, components and volume of the various units and subunits. (Modified from Allen, 2001) \_\_\_\_\_ 40

**Fig. 2.9:** Photographs of inclusions in rhyodacites of the Rum Central Igneous complex. **(A)** Type-II inclusions characterized by a dark aphyric, cryptocrystalline appearance representing magma frozen in the conduit or on eruption. **(B)** Type-III inclusions are always round and differ from type-II in having a microcrystalline texture with plagioclase lath morphologies characteristic quenching (Lofgren, 1980). This type is found throughout the rhyodacite implying repeated replenishments if the magma chamber by basic magma. (Modified from Troll et al., 2002) \_\_\_\_\_ 41

**Fig 2.10:** Stratigraphical logs of the caldera-infill succession of the Northern Marginal Zone in the Rum Central Igneous Complex in Scotland. The representative log permits to infer the caldera cycles and episodes marked by the caldera infill. (Modified from Troll et al., 2000) \_\_\_\_\_ 42

**Fig. 2.11:** Sketch representing the different step characterizing caldera evolution. Pumice eruptions, followed by collapse and growth of new cones on the caldera floor (In Williams, 1941 modified from van Bemmelen, 1929) \_\_\_\_\_ 49

**Fig. 2.12:** Simplified model of plate (piston) caldera subsidence. Ring faults are arbitrarily shown as vertical, although they can dip steeply. The landslide breccia is shown schematically at the base of caldera fill to simplify the geometry, rather than the more actualistic complex interfingering that occurs in many calderas. Presence of subcaldera magma chamber, any resurgent structures, and post-collapse volcanic constructs are omitted (Lipman, 1997). \_\_\_\_\_ 53

**Fig. 2.13:** Models of alternative subsidence geometries in relation to depth and roof geometry of underlying magma chamber (Modified from Lipman, 1997). \_\_\_\_\_ 61

**Fig. 2.14:** Stages in the development of resurgent cauldrons. Example of the stages in the resurgent cycle of the Valles caldera (Modified from Smith and Bailey, 1968) \_\_\_\_\_ 64

**Fig. 2.15:** Calderas with the different types of post-caldera volcanic activity. **(A)** Sketch showing the structure of Tao – Rusyr caldera. The central post-caldera vent indicates an A-type activity. **(B)** Sketch map of Hakone caldera. Small dots represent parasitic cones and large dots main post-caldera cones. Evidently, this distribution corresponds to an L-type activity. **(C)** Topographic map showing Peulik Volcano and the inferred outline of Ugashik caldera. Obviously, it corresponds to a M-type post-caldera volcanic activity. **(D)** Simplified structure of the composite Daisetsu volcano. \_\_\_\_\_

Many domes extruded along the caldera rim corresponding to a R-type post-caldera volcanic activity. **(E)** Geological interpretation of Nisyros – Yali group, the post-caldera activity if of type-S. \_\_\_\_\_ 69

**Fig. 2.16:** Plots of the caldera area  $A_c$  versus ash-flow magma eruption volume. Lines are drawn to indicate various depth of drawdown ( $\Delta$  or  $h$ ), assuming the magma chamber has a cylindrical shape ( $\Delta = V_m / A_c$ ). **(A)** Error bars represent best estimates, not necessarily true error. If area and volume are given in the literature as exact number, they are plotted as points. Older systems should inherently have more error than younger ones. Volumes for ocean island ash flows, such as Kikai (point 32), are underestimates due to loss of ash in the ocean. In some cases, ash flow volume is small because subterranean withdrawal of magma also contributed to caldera collapse (Modified from Smith, 1979 and Spera and Crisp, 1984). \_\_\_\_\_ 70

**Fig. 2.17:** Structures in ice-melt collapse pits in unconsolidated sediments. Relationship between downsag, outward-dipping ring fractures and vertical to inward-dipping pit walls are shown at different stages of subsidence. **(A)** Small, immature pit, formed by collapse of a circular block on an outward-dipping ring-fault. **(B)** Downsag at a larger, more mature pit has caused peripheral extension leading to multiple ring fractures. **(C)** Deep collapse pits acquire a funnel shape. Overhanging walls fail as soon as they develop, producing near-vertical and inward-dipping pit walls. \_\_\_\_\_ 71

**Fig. 2.18:** Generalized mining subsidence structure showing strain profiles for the ground surface. +**E** Maximum extension; - **E** Maximum compression; **h** Roof thickness (In Branney, 1995 modified from Whitaker and Reddish, 1989). \_\_\_\_\_ 73

**Fig. 2.19:** Model for subsidence, horizontal displacement, and strain at the surface caused by a rectangular cavity 2 m high and 200 m deep. **(A)** Subcritical case, **(B)** Critical case, and **(C)** Supercritical case. The angle of draw  $\theta$  is  $35^\circ$ . (Modified from Whittaker and Reddish, 1989). \_\_\_\_\_ 75

**Fig. 2.20:** Alternative possible caldera structures (schematic) **(Top)** Coherent collapse on a single inward-dipping ring-fault followed by topographic enlargement due to landsliding (e.g. Lipman, 1984). The structural boundary is a ring-fault whose geometry poses a space problem requiring substantial magmatic inflation. **(Bottom)** Downsag with concentric outward-dipping arcuate and ring fractures, based on evidence cited in Branney's work (1995). Caldera diameter may increase by progressive downsag and initiation of concentric ring fractures outside the first-formed pit, in addition to the failure of caldera scarps. Outermost ring fractures may have negligible downthrow. Deeply subsided calderas **(B)** develop steep walks by surficial collapse of scarps sited at outward-dipping faults. The structural boundary encloses ring fractures and may even enclose embayments. Possible effects of resurgence and regional tectonism are omitted, and caldera fill (stipple on cross-sections) is omitted from the plan views (left) to show caldera floor fractures. (Modified from Branney, 1995) \_\_\_\_\_ 78

**Fig. 2.21:** Sketch summing up the different aspects and topics commented in this section concerning the state of the art of collapse calderas. \_\_\_\_\_ 79

**Fig. 2.22:** Screen-shot the formulary included in the database. \_\_\_\_\_ 81

**Fig. 2.23:** Screen-shot of the ArcMap<sup>®</sup> project, which links the database to the GIS application. White dots in map indicate locations of the calderas included in the database. \_\_\_\_\_ 82

**Fig. 2.24:** Sketch of the CCDB architecture. \_\_\_\_\_ 83

**Fig. 2.25:** Sketch of the CCDB architecture. The database is divided into seven main sections, which include information about the caldera, the deposits and magma chamber properties, the pre- and post-caldera activity, the local, regional and plate tectonics and interesting references. In each section, field sets are shown in bold and underlined, whereas the names of the included fields have been printed in a normal font. On the right side of each of the field we added the code to characterise each of the fields according to the classification of section II.4.3.2. **CALF** Calculated field; **CLASF** Classification field; **IF** Inferred field; **NF** Numerical field; **RF** Reference field; **TF** Text field; **YNF** Yes/No field. \_\_\_\_\_ 85

**Fig. 2.26:** Schematic explanation of the components of the caldera identification number. The different world regions and their corresponding subregions are listed in Appendix III. \_\_\_\_\_ 86

**Fig. 2.27:** Outlines of the 20 world regions defined by Simkin et al. (1981) and modified by Newhall and Dzurisin (1988). The lists with the different world regions and their corresponding subregions, as well as an enlarged image of this map are compiled in Appendix II and III, respectively. \_\_\_\_\_ 87

**Fig. 2.28:** Screenshots of the CCDB web page prototype. Three different sections compose the web page. The first one, called *CCDB*, will be open to nay user and consists of a short introduction, explanation and user's manual of the calderas database. A second section, *Register*, will house a registration form. Users interested in the database should register in order to obtain a user name and a password. These will be necessary to receive the CCDB and to enter in the third section: *CCDB Community*. Registration is only for security reasons in order to avoid any misuse of the database and non-controlled modifications. In the *CCDB Community* people will be able to suggest updates and



corrections of the database, to send news about event or publications related to caldera collapse studies or to enter in the CCDB Forum. \_\_\_\_\_ 98

**Fig. 2.29:** Sketch of the equivalent diameter  $D_{CIR}$  definition.  $A_C$  Caldera area;  $A_{CIR}$  Circle area;  $D_{max}$  Maximum caldera diameter ;  $D_{min}$  Minimum caldera diameter. \_\_\_\_\_ 108

**Fig. 2.30:** (A) IUGS (International Union of the Geological Sciences) classification of aphanitic and glassy volcanic rock types. Coordinates of critical points are indicated as, for example,  $SiO_2$  wt.% = 69 and  $(Na_2O + K_2O)$  wt. % = 8 at the common corner trachyte, rhyolite, and dacite. The distinction between trachyte ( $Q < 20\%$ ) and trachydacite ( $Q > 20\%$ ) is based on the amount of normative quartz,  $Q$  from a recalculation in which  $Q + An + Ab + Or = 100$ . The amount of olivine,  $Ol$ , in the rock distinguish tephrite ( $<10\%$ ) from basanite ( $>10\%$ ). Rock-type names for more or less corresponding common phaneritic rocks are indicated in parentheses. Irregular red dashed line separates the fields of subalkaline and alkaline rock suites.(B) Division of the subalkaline rocks into tholeiitic and calc-alkaline rock suites. AFM diagram in terms of alkalis ( $Na_2O + K_2O$ ), total FeO, and MgO. Solid line separates fields of tholeiitic rocks from calc-alkaline rocks. (Modified from Best and Christiansen, 2001) \_\_\_\_\_ 113

**Fig. 2.31:** Seismic sections of various crustal types according to the classification by Condie (1993). The seismic section for the Canary Island has been extracted from Watts (1994). For the case of Iceland we illustrate only the crust thickness according to Best and Christiansen (2001).  $V_p$  corresponds to the P-wave velocity of the layer. (Modify from Condie, 1993) \_\_\_\_\_ 115

**Fig. 2.32:** Seismic sections of island arcs according to the classification of Condie (1993).  $V_p$  corresponds to the P-wave velocity of the layer. (Modified from Condie,1993) \_\_\_\_\_ 115

**Fig. 2.33:** Sketch of the different tectonic settings collapse calderas may take place. \_\_\_\_\_ 119

**Fig. 2.34:** (A) Sketch showing the relationship between the orientation of the principal stresses and the different ideal fault types. **I** Normal fault with maximum compressive stress vertical. **II** Thrust fault with minimum compressive stress vertical. **III** Strike-slip fault with intermediate compressive stress vertical. (B) Formation of an extensional duplex at an extensional (releasing) bend. Large arrows indicate the dominant shear sense of the fault zone; small arrows indicate the sense of the strike-slip and normal components of motion on the fault splays. **I** Extensional bend on a dextral strike-slip fault. **II** An extensional duplex developed from the bend in part I. **III** A block diagram showing a normal, negative, flower structure in 3-D. The block faces are vertical planes along the dashed lines in part II. (C) Formation of a contractional duplex at a contractional (restraining) jog. Large arrows indicate the dominant shear sense of the fault zone; small arrows indicate the sense of the strike-slip and normal components of motion on the fault splays. **I** Contractional bend on a dextral strike-slip fault. **II** A contractional duplex developed from the bend in part I. **III** A block diagram showing a reverse, positive, flower structure in 3-D. The block faces are vertical planes along the dashed lines in part II. (Modified from Twiss and Moores, 1992) \_\_\_\_\_ 121

**Fig. 2.35:** Sketch of the different situations regarding at which angle a force acts on a surface and the associated stress field. The force may act perpendicular or parallel to the surface or oblique. In the latter case, the force can be expressed in terms of its normal component and its shear component. \_\_\_\_\_ 122

**Fig. 2.36:** Sketch of the *CCDB DATA TABLE* structure. Main components of the table are specially marked: main column, secondary column, main row, secondary row, sector, diagonal sector and square. As represented in the figure, the headings of both main columns and main rows correspond to the name of the analysed *CHARACTERISTICS*. By contrast, headings of both secondary columns and secondary rows correspond to the name of the corresponding *CATEGORIES*. From the sketch represented in this figure, it is evident that the *CCDB DATA TABLE* is diagonal symmetric \_\_\_\_\_ 125

**Fig. 2.37:** Structure of the *CCDB DATA TABLE*. In different colours are marked the main rows and columns corresponding to the analysed *CHARACTERISTICS* \_\_\_\_\_ 126

**Fig. 2.38:** Example of one of the queries necessary to obtain the numbers for the *CCDB DATA TABLE*. \_\_\_\_\_ 128

**Fig. 2.39:** Performing the query of figure 2.28, the obtained result is introduced in corresponding squares of the *CCDB DATA BASE*. Since the table is symmetric we have to introduce the value twice. One in the sector defined as the intersection of the *CHARACTERISTIC* “Dimensions” as row and the *CHARACTERISTIC* “Age” as column and a second value in the sector defined by the intersection of the *CHARACTERISTIC* “Age” as row and the *CHARACTERISTIC* as column “Dimensions”. \_\_\_\_\_ 128

**Fig. 2.40:** Image of the *CCDB DATA TABLE* with the information obtained from the queries performed in the database. In different colours are marked the main rows and columns corresponding to the analysed *CHARACTERISTICS* . \_\_\_\_\_ 128

- Fig. 2.41:** Descriptions and illustrations of the different steps necessary to perform the *MAXIMUM NORMALIZATION* in order to analyse the information of the *CCDB DATA TABLE*. **MVR** Maximum value of the row in each sector \_\_\_\_\_ 130
- Fig. 2.42:** Image of the *CCDB DATA TABLE* once coloured. Different colours at the heading of the main rows and columns indicate different *CHARACTERISTICS*. Yellow, green, orange and red colours of the squares correspond to the intervals assign by the *MAXIMUM NORMALIZATION*. In Appendix IV is included an enlarged version of the coloured *CCDB DATA TABLE*. \_\_\_\_\_ 130
- Fig. 2.43:** Image of the *CCDB DATA TABLE* special for the *CHARACTERISTIC* “World region”. In this table we have the necessary information to study how the different *CHARACTERISTICS* are distributed over the world. \_\_\_\_\_ 132
- Fig. 2.44:** Image of the *CCDB DATA TABLE* special for the *CHARACTERISTIC* “World region”. In this table we have the necessary information to study the different *CHARACTERISTICS* in the defined world regions. \_\_\_\_\_ 133
- Fig. 2.45:** World map with the location of the collapse calderas (white circle) included in the database. \_\_\_\_\_ 134
- Fig. 2.46:** Results for the worldwide distribution of the calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. **(Top)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “World region”. Bold numbers at the right of the bars indicate the number of calderas included in the world region or *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “World region”. Furthermore, the colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” and are in agreement with those of the “*CCDB DATA TABLE*” section represented below. **(Bottom)** Section of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.43. Here are represented the number of calderas included in each world region or *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 135
- Fig. 2.47:** Results for the age distribution of the calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Age”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this age interval or *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Age”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS* \_\_\_\_\_ 136
- Fig. 2.48:** Section of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.43. Here are represented the spatial distribution of the calderas included in each *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Age”. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 137
- Fig. 2.49:** Results obtained for the calculus of the frequency of caldera-forming eruptions  $f_{CFE}$  during the last 50 Ma. **CS** Number of calderas comprised in each age interval or *CATEGORY* ;  $t_{INT}$  Number of ka covered by the *CATEGORY* \_\_\_\_\_ 138
- Fig. 2.50:** Results for the dimensions distribution of the calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. **(Left)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Dimensions”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Dimensions”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 138
- Fig. 2.51:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each *CATEGORY* of the *CHARACTERISTIC* “Dimensions”. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 139
- Fig. 2.52:** Results for the distribution of collapse types of the calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Collapse type”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Collapse type”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 140
- Fig. 2.53:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each *CATEGORY* of the *CHARACTERISTIC* “Collapse type”. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 141

**Fig. 2.54:** Results for the analysis of the volume of extruded deposits of calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Volume of extruded deposits”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this volume interval or *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Volume of extruded deposits”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 142

**Fig. 2.55:** Results for the analysis of the volume of extruded magma of calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Volume of extruded magma”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this volume interval or *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Volume of extruded magma”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 142

**Fig. 2.56:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each *CATEGORY*. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 143

**Fig. 2.57:** Results for the analysis of the composition of the magma extruded during the caldera-forming events included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Composition of extruded magma”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in this composition or *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Composition of extruded magma”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 144

**Fig. 2.58:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each *CATEGORY*. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. **f** Felsic ; **i** Intermediate; **m** Mafic; **i-f** Intermediate-felsic; **m – f** Mafic – felsic \_\_\_\_\_ 145

**Fig. 2.59:** Results for the analysis of the crustal type of samples included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram showing the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Crustal types”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Crustal types”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 146

**Fig. 2.60:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each crustal types. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 146

**Fig. 2.61:** Results for the analysis of the tectonic setting of the calderas included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Tectonic setting”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Tectonic setting”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 147

**Fig. 2.62:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas in each tectonic setting. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 149

**Fig. 2.63:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of figure 2.43 comprising the spatial distribution of calderas over or close to relevant regional faults. The colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 149

**Fig. 2.64:** Results for the analysis of the type pre-caldera edifice of samples included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Condition of the local structures”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Condition of the local structures”. **(Right)** \_\_\_\_\_

Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS*. \_\_\_\_\_ 150

**Fig. 2.65:** Section of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.43. Here are represented the spatial distribution of the calderas associated with different types of local structures. Furthermore, the colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 151

**Fig. 2.66:** Results for the analysis of the type pre-caldera edifice of samples included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Type of pre-caldera edifice”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Type of pre-caldera edifice”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS* \_\_\_\_\_ 151

**Fig. 2.67:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.43. Here are represented the spatial distribution of the calderas included in each *CATEGORY* of the *CHARACTERISTIC* “Type of pre-caldera edifice”. Furthermore, the colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 152

**Fig. 2.68:** Results for the analysis of the type caldera precursor of samples included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Type of caldera precursor”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Type of caldera precursor”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS* \_\_\_\_\_ 153

**Fig. 2.69:** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.43. Here are represented the spatial distribution of the calderas included in each *CATEGORY* of the *CHARACTERISTIC* “Type of caldera precursor”. Furthermore, the colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 154

**Fig. 2.70:** Results for the analysis of the type of post-caldera volcanic activity of samples included in the CCDB. Colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” **(Left)** Histogram with the percentages of calderas located in the different *CATEGORIES* of the *CHARACTERISTIC* “Type post-caldera volcanic activity”. Bold numbers at the right of the bars specify the number of calderas included in the *CATEGORY CS*.  $N_{ANA}$  at the left top corner indicates total number of calderas with information about the *CHARACTERISTIC* “Type of post-caldera volcanic activity”. **(Right)** Representation of information included in the “*CCDB DATA TABLE*” of Figure 2.42. Here are represented the number of calderas included in each *CATEGORY CS* \_\_\_\_\_ 155

**Fig. 2.71:** Section of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.43. Here are represented the spatial distribution of the calderas with the different types of post-caldera volcanic activity. Furthermore, the colours correspond to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*” \_\_\_\_\_ 156

**Fig. 2.72:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Age” to *CHARACTERISTICS* “Dimensions” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 158

**Fig. 2.73:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Age” to the *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 158

**Fig. 2.74:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Age” to the *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 160

**Fig. 2.75:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Age” to the *CHARACTERISTICS* “Crustal types” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 162

**Fig. 2.76:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Age” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 163

**Fig. 2.77:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 163

- 
- Fig. 2.78:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Collapse type” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 165
- Fig. 2.79:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Crustal types” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 167
- Fig. 2.80:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 168
- Fig. 2.81:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Condition of the local structures” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 169
- Fig. 2.82:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Dimensions” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 170
- Fig. 2.83:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Collapse type” to the *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 171
- Fig. 2.84:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Collapse type” to the *CHARACTERISTICS* “Crustal types” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 172
- Fig. 2.85:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Collapse type” to the *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 173
- Fig. 2.86:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Collapse type” to the *CHARACTERISTICS* “Condition of the local structures” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 174
- Fig. 2.87:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Composition of extruded magma” and vice versa. Squares are shaded according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 175
- Fig. 2.88:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Crustal types” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 177
- Fig. 2.89:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 178
- 
- Fig. 2.90:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Condition of the local structures” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 179
- Fig. 2.91:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Volume of extruded deposits” and “Volume of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 180
- Fig. 2.92:** Sections of the “*CCDB DATA TABLE*” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Composition of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Crustal types” and vice versa. Squares are coloured according to the “*MAXIMUM NORMALIZATION*”. \_\_\_\_\_ 180

- Fig. 2.93:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Composition of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 181
- Fig. 2.94:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Composition of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Type of collapse precursor” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 182
- Fig. 2.95:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Composition of extruded magma” to the *CHARACTERISTICS* “Type of post-caldera volcanic activity” and vice versa. Squares are shaded according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 183
- Fig. 2.96:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Crustal types” to the *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 185
- Fig. 2.97:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Crustal types” to the *CHARACTERISTICS* “Condition of the local structures” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 186
- Fig. 2.98:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Crustal types” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 187
- Fig. 2.99:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” to the *CHARACTERISTICS* “Condition of the local structures” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 188
- Fig. 2.100:** Sections of the “CCDB DATA TABLE” represented in Figure 2.42. Here both relationships *CHARACTERISTICS* “Tectonic setting” to the *CHARACTERISTICS* “Type of pre-caldera edifice” and vice versa. Squares are coloured according to the “MAXIMUM NORMALIZATION”. \_\_\_\_\_ 189
- Fig. 2.101:** Plot of the caldera area  $A_c$  vs. volume of extruded material  $V_m$  during the caldera-forming eruption for the calderas included in the CCDB. Lines are drawn to indicate various depth of drawdown ( $\Delta$  or  $h$ ), assuming the magma chamber has a cylindrical shape ( $\Delta = V_m / A_c$ ). (A) Error bars represent best estimates, not necessarily true error. If area and volume are given in the literature as exact number, they are plotted as points. \_\_\_\_\_ 194
- Fig. 2.102:** Graph showing the continuum spectrum of data regarding the ages of the calderas included in the CCDB. Each black square corresponds to a caldera sample. Notice that due to the type of graph, flat parts of the line indicate that there are several calderas with the same of approximately the same age. \_\_\_\_\_ 196
- Fig. 2.103:** Evolutionary sketch of the Toba caldera in four stages deduced from the structural map of the Lake Toba region after interpretation of the SPOT images. The present stage is modified from Detourbet et al. (1993). **1** Subsiding zone; **2** Caldera rims; **3** Active faults with a dominant normal component (ticks on the downthrow side); **4** Active restraining fault zone; **5** Major active strike-slip fault traces; **6** Inactive fault traces. (Modified from Bellier and S ebrier, 1995) \_\_\_\_\_ 198
- Fig. 2.104:** Graph showing the continuum spectrum of data regarding the volume of extruded material during the caldera-forming eruptions recorded in the CCDB. Each black square corresponds to a caldera sample. Notice that due to the type of graph, flat parts of the line indicate that there are several calderas with the same of approximately the same volume of extruded material. \_\_\_\_\_ 200
- Fig. 2.105:** Distribution of the individual compositions included in the rock suite felsic calc-alkaline. Observe that the most abundant are the rhyolitic and andesitic compositions or the mixture between them. \_\_\_\_\_ 201
- Fig. 2.106:** World map with the distribution of volcanoes and the plate boundaries. (In Carey, 2005 modified from Sparks et al., 1997) \_\_\_\_\_ 203
- Fig. 2.107:** Proposed stages of post-40 Ma tectonic evolution. The cartoons represent the sections from the northern end of Baja California to north-central New Mexico. (Modified from Elston and Bornhorst, 1979) \_\_\_\_\_ 207
- Fig. 2.108:** Relation of first-order plate tectonic boundaries to second-order late Cenozoic extensional features. (Modified from Eaton, 1979) \_\_\_\_\_ 207
- Fig. 2.109: (Top and left)** Satellite image with the calderas included in the CCDB located in North America (red dots). The dashed yellow lines correspond to the Canada-U.S.A and the U.S.A-Mexico borders. **(Bottom and left)** Map of the U.S.A. with the most important tectonic provinces and the related stress field. Notice that along the plate

boundary there is compression but inland dominates extension. (In Condie, 1993 modified from Zoback and Zoback, 1980) **(Right)** Map of the western sector of the U.S.A. On the map are marked the actual volcanic line related to the subduction zone and the extensional areas like the Snake River Plain, the Basin and Range and the Rio Grande Graben. Black dots correspond to the location of seismic events, solid arrows give relative plate velocities and open arrows give stress directions inferred from seismic focal mechanism studies (Modified from Turcotte and Schubert, 1992) \_\_\_\_\_ 208

**Fig. 2.110:** Time correlation between the major magmatic and tectonic events and the occurrence of collapse caldera in the U.S.A. **(Left)** Timing of tectonic and magmatic events in the Rio Grande rift area compared to major events of the western United States. (Modified from Olsen et al., 1987) **(Right)** Graph with the age distribution of the collapse caldera located in the U.S.A. Each black square corresponds to a caldera sample. Notice that the red coloured stripe indicates that age interval with the highest number of calderas. It corresponds to the beginning of the early extension in the Rio Grande rift, to the calc-alkaline volcanism and to the first stages of the Basin and Range deformation \_\_\_\_ 210

**Fig. 2.111:** Sketch of the different restrictions present in the studied field data and the performed *CCDB DATA ANALYSIS*. \_\_\_\_\_ 213

### PART III: EXPERIMENTAL STUDIES

**Fig. 3.1:** Photographs and sketches of two of the experiments conducted by Roche et al. (2000). **(A)**  $R=0.2$ . **(B)**  $R=2$ . **R** Reverse fault; **N** Normal fault. (Modified from Roche et al., 2000) \_\_\_\_\_ 222

**Fig. 3.2:** **(A)** Cross section of one of the experiments. The inner depression is bordered by outward-dipping reverse faults; outer depression is bordered by inward-dipping normal ring faults. **(B)** Plot of  $(D_i/D_o)$  vs.  $(T/D_i)$  in experiments (black dots, best fit line A) and in nature (white dots, best fit line B). **D<sub>i</sub>** Diameter of the inner depression; **D<sub>o</sub>** Diameter of the outer depression; **T** Sand-pack thickness (i.e. magma chamber analogue depth). (Modified from Acocella et al., 2001b) \_\_\_\_\_ 223

**Fig. 3.3:** Photograph and schematic cross-section in an experiment with  $R=2$ . **H** is the height of the roof. Highly brecciated material within the subsided part is shown in light grey, individualised blocks. (Modified from Roche et al., 2001). \_\_\_\_\_ 224

**Fig. 3.4:** Schematic plan view representation of the final structures that can be observed in the experiments of Komuro et al. (1984) and Komuro (1987) with materials I **(A)** and II **(B)** (See table 3.1). (Modified from Komuro et al., 1984) \_\_\_\_\_ 225

**Fig. 3.5:** Sketches of the experiments carried out by Martí et al. (1994) to show internal structure with interpretation of fault systems. **(A)** Uplift dome after tumescence. **(B)** Collapse structure formed after balloon deflation below tumescence dome. (Modified from Martí et al., 1994) \_\_\_\_\_ 226

**Fig. 3.6:** **(A)** A schematic view showing the relationship between the size of the edifice and the magmatic reservoir. Notice that the first is considerably smaller. **(B)** Cross-section for a experiments with heavy topographic masses, the subsidence concentrates along  $f_1$ , which propagates at the margin of the topography. The displacement can be seen to be greatest at depth, showing that the subsidence-controlling fault propagated upward. (Modified from Lavallée et al., 2004) \_\_\_\_\_ 227

**Fig. 3.7:** Three-dimensional reconstruction of characteristic structures formed during the experiments of Walter and Troll (2001) **(A)** Pure inflation experiment. **(B)** Pure deflation experiment. **(C)** and **(D)** multi-stage inflation and subsequent deflation experiment (Modified from Walter and Troll, 2001) \_\_\_\_\_ 228

**Fig. 3.8:** Plan view photographs of experiments made in sand. **(A)** Experiments under stress-free conditions. **(B)** Experiments under regional extension. **(C)** Experiments under regional compression. The major axes of calderas are denoted as A- and B-axes. The A-axis is taken as perpendicular to the end walls and the B-axis parallel to the end walls. (Modified from Holohan et al., 2005) \_\_\_\_\_ 229

**Fig. 3.9:** Results obtained by Acocella et al. (2004). **(A)** Photograph of a collapse experiment under extension. Cross section view parallel to the extension direction. **(B)** Sketch Line drawing of the same experiment. **(C)** Proposed mechanism for the reactivation of regional faults during collapse and for the elongation of the caldera parallel to the extension direction. **(D)** The reverse faults, where tangent in strike to the regional faults, become partly inward dipping, inducing a wider depression on the corresponding parts at surface. **(E)** No reactivation is observed when the regional faults are transverse to the reverse faults. (Modified from Acocella et al., 2004) \_\_\_\_\_ 230

**Fig. 3.10:** Sketch summing up the different aspects and topics commented in this section concerning the state of the art of collapse caldera analogue models. \_\_\_\_\_ 231

**Fig. 3.11:** (A) Deformation of the bladder during initial withdrawal. The bladder contracts, similar in radial fashion. (B) Schematic representation of the bladder deformation at a later stage, where the roof subsides vertically. (Lavallée et al., 2004) \_\_\_\_\_ 233

**Fig. 3.12:** Sketches of the experimental devices used in this work. Experimental set-up I with the balloon (magma chamber analogue) located at the centre or the lateral of the wood or glass tank, respectively. Experimental set-up II, the silicone reservoir (magma chamber analogue) is located at the centre of the wood tank ( $100 \times 100 \times 20$  cm) \_\_\_\_\_ 239

**Fig. 3.13:** Sketch of the five experimental designs carried out. (A) A-type experiments; (B) B-type experiments; (C) C-type experiments; (D) D-type experiments; (E) E-type experiments. \_\_\_\_\_ 246

**Fig. 3.14:** Structural parts of a caldera collapse with a balloon as magma chamber analogue. (A) Sketch in cross section of a caldera collapse without topography and low  $R$  value. (B) Sketch in plan view of the same collapse as in A). Red dotted line corresponds to the plan view shape of the magma chamber. Yellow colour corresponds to the non-deformed area  $N$ , blue dots to the tilted area  $T$  and white colour to the extensional zone  $E$ . (C) Photograph of experiment A-6 with the three different parts.  $E$  Extensional zone;  $E-W$  Width of the extensional zone;  $EXT-W$  ( $EXT-W = E-W + T-W$ ) Width of the external area of flexure and extension;  $N$  Non-deformed area;  $N-D$  Non-deformed area diameter;  $OL-D$  Structural limit diameter;  $P-D$  Piston diameter;  $T$  Tilted area;  $T-W$  Width of the tilted area. \_\_\_\_\_ 252

**Fig. 3.15:** Photographs of experiment A-3. (A) Cross-section of experiment A-3. (B) Plan view of experiment A-3.  $BF$  “Bell-shaped” faults;  $E$  Extensional zone;  $N$  Non-deformed area;  $RF$  Ring-fault;  $T$  Tilted area. \_\_\_\_\_ 253

**Fig. 3.16:** Images of experiment A-7. Photographs taken every 5 s show the evolution of the collapse at surface from the beginning of the experiment until the complete withdrawal of the balloon (magma chamber analogue). \_\_\_\_\_ 255

**Fig. 3.17:** Results for experiments D-1, D-3 and D-5. (A) Scheme of surface fractures inferred from photographs. Numbers indicate the order of appearance of the corresponding fracture segment. Different fill patterns show the tilted ( $T$ ), the non-deformed ( $N$ ), and the extensional ( $E$ ) areas. (B) Top view photographs. Surface fractures are clearly visible at the extensional zone. Black broken lines indicate the fractures that will evolve into vertical or sub-vertical ring faults and will delimit the piston subsidence during the last stages (FCC). (C) Cross section photographs. Numbers, in concordance with those of (A) indicate the order of appearance of fractures.  $TMC$  Top of the magma chamber analogue at the beginning of the experiment. \_\_\_\_\_ 256

**Fig. 3.18:** Different shots of the caldera collapse process of experiment D-1. The removed volume fraction  $f$  is indicated in each photograph. White numbers, in concordance with those of Figure 3.17, indicate the order of appearance of fractures at surface. \_\_\_\_\_ 257

**Fig. 3.19:** Different shots of the caldera collapse process of experiment D-3. The removed volume fraction  $f$  is indicated in each photograph. White numbers, in concordance with those of Figure 3.17, indicate the order of appearance of fractures at surface. \_\_\_\_\_ 258

**Fig. 3.20:** Different shots of the caldera collapse process of experiment D-5. The removed volume fraction  $f$  is indicated in each photograph. White numbers, in concordance with those of Figure 3.17, indicate the order of appearance of fractures at surface. \_\_\_\_\_ 259

**Fig. 3.21:** Photographs of experiment B-7. (A) Plan view of the experiment before the collapse. (B) Plan view of the experiment after the collapse. (C) Cross section of the experiment after the collapse.  $1$  Non-deformed central area of the subsiding piston;  $2$  Vertical ring faults bounding the piston. \_\_\_\_\_ 260

**Fig. 3.22:** Sketch of the evolution in time of a collapse caldera with pre-existing topography. The photograph corresponds to experiment E-1. \_\_\_\_\_ 261

**Fig. 3.23:** Cross section and plan view photographs of experiment C-1.  $A$  Non-deformed central area;  $B$  Vertical normal ring faults delimiting the piston;  $C$  Reverse faults that do not reach the surface. \_\_\_\_\_ 261

**Fig. 3.24:** Sketches showing different stages in the structural evolution of the collapse process. Notice that for constant values of  $f$  structural development is strongly dependent on the roof aspect ratio  $R$ . \_\_\_\_\_ 264

**Fig. 3.25:** Dependency  $f(R)$ . (A) Appearance of the first fractures at surface. (B) The “bell-shaped” reverse faults reach the surface. A log-fit to experimental data is given in both cases.  $r$  Coefficient of determination ( $r^2 = 1$  implies perfect fit). \_\_\_\_\_ 265

**Fig. 3.26:** Erupted volume fraction at the caldera onset as a function of  $R$ . Grey squares indicate experimental  $f_{CRIT}$  values ( $f$  values at the caldera collapse onset). A discontinuous line shows the log-fit to experimental values. Values of  $f_{CRIT}$  for natural examples are calculated considering different percentages (100% - 60%) of erupted magma (see text for details). Horizontal lines in triangles ( $f_{CRIT}$  values considering that the magma chamber is completely



emptied) are the error bars due to the roof aspect ratio uncertainty. The vertical lined zone line marks the transition from subcritical to supercritical collapses. \_\_\_\_\_ 266

**Fig. 3.27:** Values of  $\gamma$  towards  $f$  for the different experiments. For low aspect ratios ( $R < 0.7-0.85$ ) experimental data fit to a linear function. For high aspect ratios ( $R > 0.7-0.85$ ), data do not fit to a linear function up to the “bell-shaped” faults (BFs) have reached the surface. Notice that  $f = 100\%$  implies that the water-filled balloon is completely empty and  $\gamma = 1$  that subsidence is equal to the balloon’s. \_\_\_\_\_ 270

**Fig. 3.28:** Values of  $\gamma$  towards  $f$  for the different experiments. Notice that  $f = 100\%$  implies that the water-filled balloon is completely empty and  $\gamma = 1$  that subsidence is equal to the balloon’s height. \_\_\_\_\_ 272

**Fig. 3.29:** Graph of normalized values for outer limit diameter  $OL-D_{NOR}$ , piston diameter  $P-D_{NOR}$  and non-deformed area diameter  $N-D_{NOR}$  towards roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 273

**Fig. 3.30:** Structural parts of a caldera collapse a silicone reservoir as magma chamber analogue. (A) Sketch in cross section of a caldera collapse without topography and low  $R$  value. (B) Sketch in plan view of the same collapse as in (A). Red dotted line corresponds to the plan view shape of the magma chamber. Yellow colour corresponds to the non-deformed area  $N$  and blue dots to the tilted area  $T$ . (C) Photograph of experiment A-6 with the three different parts. **EXT-W** Width of the external area of flexure and extension; **N-D** Non-deformed area diameter; **N** Non-deformed area; **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems; **OL-D** Outer limit diameter; **P-D** Piston diameter; **T-W** Tilted area width; **T** Tilted area. \_\_\_\_\_ 277

**Fig. 3.31:** Photographs of flat silicone reservoir experiments (left) Cross section. (right) Plan view. \_\_\_\_\_ 278

**Fig. 3.32:** Photographs and sketches of the experiments type  $SIL_{SEC}$ . (A) Cross-sections of the experimental results. (B) Plan view photographs. \_\_\_\_\_ 279

**Fig. 3.33:** Evolution in time of the extensional area width **EXT-W**, the diameter of the non-deformed area **N-D** and the diameter of the outer limit **OL-D**. Values are normalized. \_\_\_\_\_ 280

**Fig. 3.34:** Photographs of curved silicone reservoir experiments (left) Cross-section and plan view. (right) Photograph and sketch of the silicone reservoir) \_\_\_\_\_ 281

**Fig. 3.35:** Cross section photograph of experiment  $SIL-10$ . In yellow colour the silicone and with red stars the point of fault nucleation clearly displaced from the sharp reservoir corner. \_\_\_\_\_ 281

**Fig. 3.36:** Graph of normalized values for outer limit diameter  $OL-D_{NOR}$ , extensional zone width  $EXT-W_{NOR}$  and non-deformed area diameter  $N-D_{NOR}$  towards roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 283

**Fig. 3.37:** Normalized values of the outer limit diameter  $OL-D_{NOR}$  towards roof aspect ratio. In the figure are included data for balloon and silicone models, as well as the best fit log- and linear function of both type of experimental devices. \_\_\_\_\_ 286

**Fig. 3.38:** Normalized values of the piston diameter  $P-D_{NOR}$  towards roof aspect ratio. In the figure are included data for balloon and silicone models, as well as the best-fit linear function for silicone experimental results. \_\_\_\_\_ 287

**Fig. 3.39:** Normalized values of the piston diameter  $N-D_{NOR}$  towards roof aspect ratio. In the figure are included data for balloon and silicone models, as well as the best-fit linear function for silicone experimental results. \_\_\_\_\_ 288

**Fig. 3.40:** Percentage area of the collapse occupied by the external area (**%EXT**). Dotted black line marks the limit between the subcritical (piston collapse) and the supercritical (multiple fault collapse) collapse type defined by Roche et al. (2000). On the right corner, the graph published by Roche et al. (2000). Best-fit log-functions for balloon and silicone models are also included. \_\_\_\_\_ 290

**Fig. 3.41:** Percentage area of the collapse occupied by the extensional area. Dotted line marks the limit between the subcritical (piston collapse) and the supercritical (multiple fault collapse) collapse type defined by Roche et al. (2000) \_\_\_\_\_ 293

## PART IV: MATHEMATICAL MODELS

**Fig. 4.1:** Sketch of the pressure evolution during a caldera-forming event cycle.  $P_L$  Lithostatic pressure;  $P_M$  Magmatic pressure;  $+\Delta P$  Overpressure;  $-\Delta P$  Underpressure;  $\Delta P_{COLL}$  Underpressure necessary to induce caldera collapse;  $\Delta P_{START}$  Overpressure necessary to break the host rock by tension. \_\_\_\_\_ 304

**Fig. 4.2:** Example of the model geometry applied by Folch and Martí, 2004.  $\square$  Fault dip angle;  $-\Delta P$  Underpressure. **D** Magma chamber diameter; **H** Magma chamber vertical extent; **P** Magma chamber depth. (Modified from Folch and Martí, 2004). \_\_\_\_\_ 306

**Fig. 4.3:** Schematic representation of an explosive caldera collapse process (see text for more details). Solid dots indicate points inside the magma chamber for which  $P_m$  is indicated.  $P_M$  Magmatic pressure;  $P_L$  Lithostatic pressure;  $\Delta P_{START}$  Overpressure required to fracture the country rock and to form a conduit to the surface;  $\Delta P_{COLL}$  Shear strength of the rock, i.e. the underpressure necessary to initiate caldera collapse. (Modified from Martí et al., 2000). \_\_\_\_\_ 309

**Fig. 4.4:** Example of some of the results presented by Martí et al., 2000. **(A)** Magma pressure at the chamber roof as a function of the erupted mass fraction for different chamber geometries. Water content is constant and equal to 5 wt%. Dashed lines: results using cylindrical geometries (piston-like model). Continuous lines: results using ellipsoidal geometries with semi-axes **a** and **b**. **(B)** Erupted mass fraction at the onset of collapse as a function of the aspect ratio (**a/b**) of the chamber, considering volume constant. Results for different underpressure ( $\Delta P_{COLL}$ ) values. Water content is constant and equal to 5 wt%. **(C)** Magma pressure at the chamber roof as a function of the erupted mass fraction for different water contents. **(D)** Erupted mass fraction at the onset of collapse ( $P_{TOP} = P_L - \Delta P_{COLL}$ ) as a function of the water content for different underpressure ( $\Delta P_{COLL}$ ) values. (Modified from Martí et al., 2000). \_\_\_\_\_ 311

**Fig. 4.5:** Boundary-element results showing the contours of the maximum principal tensile stress in MPa. Models simulating a magma chamber subject to remote horizontal tensile stress. Two chamber reservoir shapes have been considered: spherical shape **(A)** and sill-like **(C)**. The other two sketches represent the results of models emulating a magma chamber under the effects of a magmatic overpressure in a reservoir located at the base of the volcanic field containing the magma chamber. Two different chamber reservoir shapes have been considered: spherical shape **(B)** and sill-like **(D)**. (Modified from Gudmundsson, 1998). \_\_\_\_\_ 313

**Fig. 4.6:** Summary of simulation performed by Folch and Martí, 2004. Chamber configurations are plotted using a small cross in terms of the dimensionless parameters  $\kappa$  ( $D/2P$ ) and  $e$  ( $D/H$ ) (the latter in logarithmic scale). Cases that verify the conditions for ring fault formation lay in region A, whereas the rest lay in region B. The approximate critical limit that separates these two regions is marked using a dotted line for two different values of fault dip angle  $\alpha_{CRIT}$ . The domain for which results of analogue models exist is indicated in grey. The position in the diagram of some documented collapse calderas is also shown using black dots. Topinset: schematic representation, not at scale, of the ring fault structure suggested by: (1) numerical experiments for region A, and (2) experimental models for region B. (Modified from Folch and Martí, 2004) \_\_\_\_\_ 315

**Fig. 4.7:** Sketch summing up the different aspects and topics commented in this section concerning the state of the art of collapse caldera analogue models. **f** Erupted magma chamber volume fraction necessary to trigger caldera collapse. \_\_\_\_\_ 319

**Fig. 4.8:** Sketch of the three main fracture modes: Mode I is opening or tensile mode. The forces are perpendicular to the crack pulling the crack open. Mode II is sliding or in plane-shear mode. The forces are parallel to the crack. The crack surfaces slide over one another perpendicular to the leading edge of the crack. Mode III is tearing or antiplane shear mode. The crack surfaces move relative to one another and parallel to the leading edge of the crack (Modified from Ramsay and Huber, 1983). \_\_\_\_\_ 325

**Fig. 4.9:** Stress components in 2-D and 3-D (Modified from Turcotte and Schubert, 2002). \_\_\_\_\_ 327

**Fig. 4.10:** Sketches of the different possibilities of modelling a cube of size  $1 \times 1 \times 1$  length units (LU) with fixed basis, i.e. the displacement  $u$  in all directions is equal to zero ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ) and subjected to an excess pressure of  $10^3$  pressure units (PU) on its top. **(A)** Sketch of the example's geometry and boundary conditions. **(B)** Sketch of the example's geometry in 2-D with the assigned boundary conditions. **(C)** Sketch of the example considering axial symmetry. **(D)** Sketch of the 3-D solution of the example with the prescribed boundary conditions \_\_\_\_\_ 330

**Fig. 4.11:** Sketches representing the main characteristics of a "plane stress" and "plane strain" situations. In a "plane stress" state of stress one component of principal stress is zero, i.e.  $\sigma_3 = 0$ ,  $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 \neq 0$ . In the case of "plane strain",  $\epsilon_3 = 0$ , and  $\epsilon_1$  and  $\epsilon_2$  are not zero (Modified from Turcotte and Schubert, 2002). \_\_\_\_\_ 331

**Fig. 4.12:** Results obtained when solving the proposed model of Figure 4.10 A with the different numerical approaches. We include in the Figure the distribution of the displacement values,  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$ . Values of displacement are normalized to the height of the cube 1 LDU and values of stress to the imposed excesses pressure of  $10^3$  PU \_\_\_\_\_ 333

**Fig. 4.13:** **(Top)** Sketch of the experimental devices reproduced numerically **(Bottom)** Geometrical setting and boundary conditions of the performed numerical models. The 2-D geometrical setting corresponds to a rectangle with fixed laterals and base ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). The magma chamber analogue is reproduced by an elliptical hole (white) in the rectangle. The upper part is free. The 3-D geometrical setting consists of a prism with fixed laterals and base

(grey). The magma chamber analogue corresponds to an ellipsoidal hole (coloured in blue) and the upper surface is free (red).  $D_{\max}$  Balloon maximum diameter;  $H$  Balloon height;  $P$  Balloon depth;  $T$  Sand-pack thickness;  $W.F.$  Water flow direction. \_\_\_\_\_ 334

**Fig. 4.14: (Top)** Sketch of the experimental device reproduced numerically **(Bottom)** Geometrical setting and boundary conditions of the performed numerical models. The geometrical setting with axial symmetry corresponds to a rectangle (coloured in grey) with one of the laterals corresponding to the symmetry axis and consequently, with displacements in the horizontal direction  $x$  fixed to zero ( $u_x = 0$ ). The other lateral and the base of this rectangle are fixed to zero displacement in any direction ( $u_x = u_y = 0$ ). In orange colour are indicated those parts of the base free of the prior boundary condition and representing the silicone reservoir. The upper part of the rectangle is free. The 3-D geometrical setting consists of a prism with fixed laterals and base (grey). The silicone reservoir corresponds to a small free surface cut in the centre of the fixed base (flat silicone reservoir) or to a hemisphere (curved silicone reservoir). The upper surface (red) is free. **A** Height of the silicone reservoir; **D** Silicone reservoir diameter; **P** Silicone reservoir depth; **T** Sand-pack thickness. \_\_\_\_\_ 336

**Fig. 4.15:** Sketches of the two possible boundary conditions we can assign to our models in order to simulate the experiments with a water-filled balloon as magma chamber analogue. **(A)** The limits of the computational domain are fixed ( $u_x = u_y = 0$ ) and we impose underpressure  $-\Delta P$  at the magma chamber walls. **(B)** The limits of the computational domain are fixed ( $u_x = u_y = 0$ ) and we impose a traction the  $y$  – direction \_\_\_\_\_ 338

**Fig. 4.16:** Results obtained when running two models in 2-D with identical geometrical setting but one with assigned radial underpressure  $-\Delta P$  and the other with vertical traction  $VT$  both focused to simulate analogue magma chamber deflation. The geometrical setting corresponds to the geometry of the experiment D-1 in 2-D. At the bottom the distribution of  $\sigma_3$  at surface plotted versus distance (in cm) along the tank. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface. \_\_\_\_\_ 339

**Fig. 4.17: (A)** Sketch of the flow of the silicone through the reservoir's tube. The silicone moves vertically with higher velocity at the centre and lower close to the tube walls due to the existence of friction forces. **(B)** Sketch of a section of the silicone reservoir analogue experiments. The excess of weight of the overlying sand-pack produces the silicone outflow. At the beginning of the experiment, prior to the burial of the silicone reservoir by the sand, the pressure at the points  $P_A$  and  $P_B$  are equal to atmospheric pressure. Once the sand has been introduced in the tank the pressure at the point  $P_A$  increases due to the weight of the overlying sand-pack. \_\_\_\_\_ 339

**Fig. 4.18:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiments D-1 and D-5 in a 2-D and a 3-D geometrical setting. Contour fills of the  $\sigma_1$  - $\sigma_3$  and  $\sigma_3$ . Stress values are normalized to magma chamber underpressure. Negative values for  $\sigma_3$  imply extension. \_\_\_\_\_ 343

**Fig. 4.19:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiments D-1, D-4 and D-5 with a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure horizontal coloured rectangles indicate the magma chamber analogue horizontal extension in each of the reproduced experiments. Small black crosses indicate the limit of the computational domain with assigned fixed zero displacement ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). At the bottom, distribution of  $\sigma_3$  at surface plotted versus distance (in cm) along the tank. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D<sub>max</sub>** Maximum diameter of the outer limit of the collapse; **P-D<sub>max</sub>** Maximum piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 344

**Fig. 4.20:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiments D-1, D-4 and D-5 in a 2-D and a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure horizontal coloured rectangles indicate the magma chamber analogue horizontal extension in each of the reproduced experiments. Small black crosses indicate the limit of the computational domain with assigned fixed zero displacement ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). At the bottom, distribution of  $\sigma_3$  at surface plotted versus distance (in cm) along the tank. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D<sub>max</sub>** Maximum diameter of the outer limit of the collapse; **P-D<sub>max</sub>** Maximum piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 345

**Fig. 4.21:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiment SIL-3 in the axial symmetric geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. Small black crosses at the laterals indicate the limit of the computational domain, i.e. the walls of the experimental tank. These limits have assigned zero displacement in any spatial directions ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). Moreover, the horizontal the coloured rectangle indicates the magma chamber analogue horizontal extension for all reproduced experiments. The Figure includes the contour fills of  $\sigma_1$  - $\sigma_3$  and  $\sigma_3$  Stress values are normalized to the pressure increase due to the sand-pack weight. Negative values for  $\sigma_3$  imply extension. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **P-D** Piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 347

**Fig. 4.22:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiments SIL-1, SIL-2, SIL-3 and SIL-7 in a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. Small black crosses at the laterals indicate the limit of the computational domain, i.e. the walls of the experimental tank. These limits have assigned zero displacement in any spatial directions ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). Moreover, the horizontal the coloured rectangle indicates the magma chamber analogue horizontal extension for all reproduced experiments. The Figure includes also the distribution of  $\sigma_3$  at surface versus distance (in cm) along the tank. Values of  $\sigma_3$  are normalized to the maximum pressure increase due to the sand-pack weight. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **P-D** Piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 348

**Fig. 4.23:** Comparison of the results obtained when reproducing numerically the analogue experiments SIL-1, SIL-2, SIL-3 and SIL-7 using an axial symmetric (AS) and a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. Small black crosses at the laterals indicate the limit of the computational domain, i.e. the walls of the experimental tank. These limits have assigned zero displacement in any spatial directions ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). Moreover, the horizontal the coloured rectangle indicates the magma chamber analogue horizontal extension for all reproduced experiments. The Figure includes also the distribution of  $\sigma_3$  at surface versus distance (in cm) along the tank. Values of  $\sigma_3$  are normalized to the maximum pressure increase due to the sand-pack weight. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **P-D** Piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 349

**Fig. 4.24:** Results obtained when reproducing numerically the analogue experiments SIL-9, SIL-10, SIL-11 and SIL-12 with an axial symmetrical geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. Small black crosses at the laterals indicate the limit of the computational domain, i.e. the walls of the experimental tank. These limits have assigned zero displacement in any spatial directions ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). Moreover, the horizontal the coloured rectangle indicates the magma chamber analogue horizontal extension for all reproduced experiments. The Figure includes also the distribution of  $\sigma_3$  at surface versus distance (in cm) along the tank. Values of  $\sigma_3$  are normalized to the maximum pressure increase due to the sand-pack weight. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **P-D** Piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 350

**Fig. 4.25:** Comparison of the results obtained when reproducing numerically the analogue experiments SIL-1, SIL-2, SIL-3 and SIL-7 using an axial symmetric (AS) and a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. Small black crosses at the laterals indicate the limit of the computational domain, i.e. the walls of the experimental tank. These limits have assigned zero displacement in any spatial directions ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ). Moreover, the horizontal the coloured rectangle indicates the magma chamber analogue horizontal extension for all reproduced experiments. The Figure includes also the distribution of  $\sigma_3$  at surface versus distance (in cm) along the tank. **D** Magma chamber diameter; **h** Distance from the vertical projection of the chamber to the peak of  $\sigma_3$  at surface; **MTSdis** Distance between both symmetrical peaks of  $\sigma_3$  at surface; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **P-D** Piston diameter at surface. \_\_\_\_\_ 351

**Fig. 4.26:** Comparison of the results obtained when reproducing numerically the analogue experiments SIL-2 and SIL-7 using an axial symmetric (AS) and a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the geometrical setting of the reproduced models. The horizontal coloured rectangle indicates the magma chamber analogue diameter. The Figure includes also the displacement at surface versus distance along the tank. Values of displacement are normalized to the magma chamber diameter. **D** Magma chamber diameter. \_\_\_\_\_ 355

**Fig. 4.27:** Sketch of the corresponding geometrical setting and boundary conditions of the performed numerical models. The axial symmetric geometrical setting corresponds to a rectangle with fixed laterals and base ( $u_x = u_y = 0$ ). The magma chamber is reproduced by an elliptical hole (white) in the rectangle. The top of the rectangle is traction free and. The 3-D geometrical setting consists of a cylinder with fixed laterals and base (grey). The magma chamber corresponds to a ellipsoidal lenticular hole. The upper surface of the cylinder corresponds to the Earth's surface and is traction free (red). **D** Magma chamber diameter; **H** Magma chamber height; **P** Balloon depth. \_\_\_\_\_ 356

**Fig. 4.28:** Results obtained for the numerical models NR-0.2 3-D, NR-0.2 AS, NR-0.6 3-D and NR-0.6 AS. Contour fills of  $\sigma_1$  - $\sigma_3$  and  $\sigma_3$ . Stress values are normalized to magma chamber underpressure. Negative values for  $\sigma_3$  imply extension. \_\_\_\_\_ 359

**Fig. 4.29:** Comparison of the results obtained when using an axial symmetric (AS) or a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure a sketch illustrates the location of the magma chamber to facilitate the comprehension of the plots. The Figure includes the distribution of the displacements and of  $\sigma_3$  at surface versus distance respect the magma chamber axis. Values of displacements and distances are normalized to the magma chamber diameter and those of  $\sigma_3$  to the magma chamber underpressure  $-\Delta P$ . The angle  $\varpi$  (Fig. 4.2), localized between the vertical and the line that draw from the edges of the cavity marks the peak of  $\sigma_3$  at surface and has been calculated according to

Equation 4.1. **D** Magma chamber diameter; **H** Magma chamber height; **P** Magma chamber depth; **R** Roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 360

**Fig. 4.30:** Mesh of model NR-0.2 AS ( $R=0.2$  and axial symmetric). \_\_\_\_\_ 361

**Fig. 4.31:** Detailed comparison of the results obtained when using an axial symmetric (AS) or a 3-D geometrical setting. On the top of the Figure different mesh of model NR-0.2 3-D ( $R=0.2$ , 3-D). The Figure includes the distribution of the displacements and of  $\sigma_3$  at surface versus distance respect the magma chamber axis. Values of displacements and distances are normalized to the magma chamber diameter and those of  $\sigma_3$  to the magma chamber underpressure  $-\Delta P$ . **D** Magma chamber diameter; **R** Roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 363

**Fig 4.32:** (A) Contour fills of  $\sigma_1-\sigma_3$  and  $\sigma_3$  for two magma chambers with  $e=8$  and  $R=0.5$  and  $0.17$  after a decompression of 10 MPa. In both cases, only the region of the computational domain around the chamber is shown. The regions where  $\sigma_3 < -T_0$  for  $T_0 = 10$  MPa, i.e. where tensile fractures can be produced according to condition (1), are indicated in black. Regarding the contour fills of  $\sigma_1-\sigma_3$ , the regions where  $\sigma_1-\sigma_3 > S_0$  for  $S_0 = 50$  MPa, i.e. where shear fractures can be produced according to (2), are indicated in black. In any case, distances are given in km and stresses in MPa. For  $R=0.17$ , both shear and tensional fractures are produced in a way that encourage the formation of subvertical normal ring-faults. (B) Values of  $\sigma_3$  at surface plotted versus radial distance for values of  $R=0.5$  and  $0.17$ . Stress values are normalised to chamber underpressure whereas radial distance is normalised to chamber extension, i.e. the surface projection of the chamber walls peaks at dimensionless distance 1. The origin of coordinates is at the symmetry axis. \_\_\_\_\_ 366

**Fig. 4.33:** Schematic illustration of a typical fault zone consisting of two main mechanical units: a comparatively thin core and a much thicker damage zone. The effective Young's modulus (stiffness) decreases from the host rock to the boundary between the core and the damage zone. \_\_\_\_\_ 368

**Fig. 4.34:** Boundary-element model of fault displacement. (A) The boundary conditions and the variation in Young's modulus (stiffness) in the core and damage zone. (B) The damage-zone thickness is gradually increased in 10 steps. Step 10 corresponds to the mechanical units and stiffnesses shown in (A). \_\_\_\_\_ 369

**Fig. 4.35:** Results obtained for step 10. Contour fills correspond to (A) Displacements. (B) Values of  $\sigma_3$  (the maximum principal tensile stress). \_\_\_\_\_ 371

**Fig. 4.36:** Maximum normalized displacement (MND) in the fault center in each of the 10 steps (Fig. 3). Here  $MND = 10^4 \times MD/FL$ , where  $MD$  is the maximum displacement and  $FL$  the fault length, both expressed in model length units. \_\_\_\_\_ 371

**Fig. 4.37:** Displacement curves along the length of the fault in each of the 10 steps (Fig. 4.34). \_\_\_\_\_ 372

## PART IV: DISCUSSION

**Fig. 5.1:** Shot of the caldera collapse process of experiment D-5. The removed volume fraction  $f$  is indicated. White numbers, in concordance with those of Figure 3.17, indicate the order of appearance of fractures at surface. Inclined broken blue lines indicate the zone of influence of the collapse. \_\_\_\_\_ 381

**Fig. 5.2:** Structural parts of a caldera collapse with a balloon (A) or a silicone reservoir (B) as magma chamber analogue. **E-W** Width of the extensional zone; **EXT-W** ( $EXT-W = E-W + T-W$ ) Width of the external area of flexure and extension; **H** Height of the balloon; **OL-D** Structural limit diameter; **P** Depth of the top of the balloon; **P-D** Piston diameter. \_\_\_\_\_ 382

**Fig. 5.3:** Sketch of the evolution of both a "Cordilleran type" and a "Composite volcano type caldera".  $\Delta P_{COLL}$  Underpressure required to induce caldera collapse;  $\Delta P_{START}$  Overpressure required to trigger an eruption;  $P_L$  Lithostatic pressure;  $P_M$  Magmatic pressure. \_\_\_\_\_ 387

**Fig. 5.4:** pressure evolution inside the magma chamber during the whole caldera-forming cycle.  $\Delta P_{COLL}$  Underpressure required to induce caldera collapse;  $\Delta P_{START}$  Overpressure required to trigger an eruption;  $P_L$  Lithostatic pressure;  $P_M$  Magmatic pressure. \_\_\_\_\_ 389

**Fig. 5.5:** Spatial scale and relationship between those geological processes that influence and determine the nature of an eruption at surface. These processes are controlled by specific factors also represented in the sketch. **OC** Oceanic crust; **IC** Intermediate/transitional crust; **CC** Continental crust; **LIPs** Large igneous provinces; **MC** Magma chamber;  $P_L$  Lithostatic pressure;  $P_M$  Magmatic pressure; **RS** Rock resistance;  $\Delta P_{COLL}$  Underpressure required to induce caldera collapse. \_\_\_\_\_ 390

# LIST OF TABLES

## PART I: INTRODUCTION

**Table 1.1:** Examples of mineralized ash-flow calderas (Modified from Guillou-Frottier et al., 2000). \_\_\_\_\_ 15

## PART II: FIELD STUDIES

**Table 2.1:** *CHARACTERISTIC* considered in the field data analysis. Furthermore, we indicate the *FIELDS* and *CLASSIFICATION FIELDS* that record all the information regarding the different *CHARACTERISTICS*. Moreover, we added the information related to the location of these fields in the database according to Figure 2.25. \_\_\_\_\_ 105

**Table 2.2:** Classification of the main compositional groups considered in the statistical analysis and the corresponding subgroups and compositions. \_\_\_\_\_ 113

## PART III: ANALOGUE MODELS

**Table 3.1:** List of the existing studies of analogue models of caldera collapse. A short description and sketch of the experimental device is included as well as the physical properties of the analogue materials. \_\_\_\_\_ 220/221

**Table 3.2:** Principal characteristics of the analogue materials used in this study. \_\_\_\_\_ 238

**Table 3.3:** List of the experiments carried out with a water-filled balloon as magma chamber analogue. Definitions of the different variables are summed up in table 3.5. The letters before the experiment number indicate the type of experiment corresponding with Figure 3.19.  $\alpha$  Slope of the volcanic cone 1;  $\beta$  Slope of the volcanic cone 2;  $D_{max}$  Balloon maximum diameter;  $D_{min}$  Balloon minimum diameter;  $H$  Balloon height;  $He_1$  Volcanic cone height;  $He_2$  Height of the volcanic cone 2; **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems;  $R$  Roof aspect ratio defined as  $R = [(P+He_1)(D_{max}+D_{min})]/2D_{max}D_{min}$  (Roche and Druitt, 2001);  $Ra_1$  Radius of the volcanic cone 1;  $Ra_2$  Radius of the volcanic cone 2;  $t$  Duration of the experiment;  $P$  Balloon depth;  $V$  Total extruded volume of water from the balloon. \_\_\_\_\_ 247

**Table 3.4:** Variables relevant in the analogue models with a water-filled balloon as magma chamber analogue. Those coloured in blue are considered as “principal” and important for a correct scaling of the geological process of caldera collapse. **n.d.** Not determinable. \_\_\_\_\_ 248

**Table 3.5:** Values of the  $\Pi$  dimensionless numbers in experiments and in nature. Numbers in square brackets indicate the data source of the natural examples. \_\_\_\_\_ 249

**Table 3.6:** Relevant measured or calculated parameters in balloon analogue models. **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems;  $N-D_{max}$  Maximum diameter of the non-deformed area;  $N-D_{min}$  Minimum diameter of the non-deformed area;  $OL-D_{max}$  Maximum diameter of the outer limit of the collapse;  $OL-D_{min}$  Minimum diameter of the outer limit of the collapse;  $P-D_p$  piston diameter at depth;  $P-D_{smax}$  Maximum piston diameter at surface;  $P-D_{smin}$  Minimum piston diameter at surface;  $S_p$  subsidence at depth;  $S_s$  subsidence at surface. \_\_\_\_\_ 251

**Table 3.7:** Values of  $f$  at which the different structural sets or phenomena appear. Rounded values for  $A$  and  $B$  in a log fit  $f(R) = A \ln(R) + B$  are also given.  $r^2$  Coefficient of determination ( $r^2 = 1$  implies a perfect fit); **SF** Surface fracture; **BSF** “Bell-shaped” fault. \_\_\_\_\_ 263

**Table 3.8:** Natural examples.  $D$  ( $D_{min} \times D_{max}$ ) Caldera diameter, i.e. magma chamber diameter;  $P$  ( $P_{min} - P_{max}$ ) Magma chamber depth;  $R$  roof aspect ratio;  $V_{PC}$  Volume of the pre-caldera deposits given in DRE (dense-rock equivalent);  $V_{TD}$  Total volume of deposits given in DRE. \_\_\_\_\_ 267

**Table 3.9:** Rounded values for  $A$  and  $B$  in a linear fit  $\gamma = A f + B$ .  $r^2$  is the coefficient of determination ( $r^2$  implies a perfect fit). In the case of high roof aspect ratios ( $R=0.7$ ), the subsidence pattern is subdivided in two different linear-functions. Approximately, the change takes place when the “bell-shaped” faults reach the surface. \_\_\_\_\_ 270

**Table 3.10:** List of experiments with silicone reservoir carried out in this study. **D** Silicone reservoir diameter; **e** Silicone reservoir eccentricity defined as  $0.5 \times D/A$  ( $e = 1$  implies an hemispheric silicone reservoir and  $e = 0$  flat roof); **P** Depth of the silicone reservoir; **R** Roof aspect ratio =  $P/D$ ; **t** Duration of the experiment. \_\_\_\_\_ 274

**Table 3.11:** Variables relevant in the analogue models with silicone as magma analogue. All variables are red are considered as “principal” and important for a correct scaling of the geological process of caldera collapse. Cited bibliography is referred to natural values sources. \_\_\_\_\_ 275

**Table 3.12:** Values of the  $\Pi$  dimensionless numbers in experiments and in nature. \_\_\_\_\_ 275

**Table 3.13:** Relevant measured or calculated parameters in silicone analogue models. **EXT-W** Width of the external area of flexure and extension; **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems; **N-D** Diameter of the non-deformed area; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **S<sub>p</sub>** Subsidence at depth; **S<sub>s</sub>** Subsidence at surface. \_\_\_\_\_ 276

**Table 3.14:** Table of verified experiments (balloon and silicones experiments). **%EXT** Percentage of external area; **N-D** Non-deformed area diameter; **R** Roof aspect ratio; **P** Analogue magma chamber depth; **P-D** Piston-diameter. \_\_\_\_\_ 291

**Table 3.15:** Geometrical features of selected calderas in nature (Acocella et al., 2001b). Roof aspect ratio **R** obtained considering  $R = T/Do$  ( $R = P/P-D$ ). **N-D** Non-deformed area diameter; **P** Analogue magma chamber depth; **P-D** Piston-diameter; **R** Roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 292

## PART IV: MATHEMATICAL MODELS

**Table 4.1:** List of the existing studies of numerical models related to caldera collapse. A short description of the models as well as the applied rheology (AR) and the values for the principal parameters are indicated.  **$\rho$**  Density;  **$\nu$**  Poisson’s ratio; **+ $\Delta P$**  Magma chamber overpressure; **- $\Delta P$**  Magma chamber underpressure;  **$\Delta P_{COLL}$**  Collapse trigger underpressure;  **$\theta$**  Ring fault dip angle; **B** Bulk modulus; **c** Cohesion; **C<sub>0</sub>** Compression strength; **CT** Crust Thickness; **D** Magma chamber horizontal extent, i.e. diameter **E** Young modulus; **ec** Ellipticity coefficient; **EL**: Elasticity; **ELP** Elastoplastic; **ELPD** Elastic-plastic-ductile; **ELPV** Elastic-visco-plastic; **fa** Friction angle; **fc** Friction coefficient; **GCTS** Griffith criterion under tensile strength; **H** Magma chamber vertical extent, i.e. height; **HF** Heat Flow; **mcc** Magma crystal content; **NV** Non-linear viscous; **P** Magma chamber depth; **PL** Plasticity; **S<sub>0</sub>** Shear strength; **T** Temperature; **TEL** Thermoelasticity; **TR** Tectonic regime; **T<sub>0</sub>** Tensile strength;  **$\nu$**  Viscosity; **vc** Volatile content; **VM** Von Mises failure criterion; **vol** Magma chamber volume; **wc** water content. \_\_\_\_\_ 307/308

**Table 4.2:** Sections of tables 3.3 and 3.6. List of the analogue experiments reproduced numerically. **(A)** Input parameters of the analogue models. **(B)** Relevant measured or calculated parameters in balloon analogue models.  **$\alpha$**  Slope of the volcanic cone 1;  **$\beta$**  Slope of the volcanic cone 2; **D<sub>max</sub>** Balloon maximum diameter; **D<sub>min</sub>**: Balloon minimum diameter; **H** Balloon height; **He<sub>1</sub>** Volcanic cone height; **He<sub>2</sub>** Height of the volcanic cone 2; **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems; **N-D<sub>max</sub>** Maximum diameter of the non-deformed area; **N-D<sub>min</sub>** Minimum diameter of the of the outer limit of the collapse; **OL-D<sub>max</sub>** Maximum diameter of the outer limit of the collapse; **OL-D<sub>min</sub>** Minimum diameter piston diameter at surface; **P** Balloon depth; **P-D<sub>smax</sub>** Maximum piston diameter at surface; **P-D<sub>smin</sub>** Minimum piston diameter at surface; **P-D<sub>p</sub>** Piston diameter at depth; **R** Roof aspect ratio defined as  $R = [(P+He_1)(D_{max}+D_{min})]/2D_{max}D_{min}$  (Roche and Druitt, 2001); **Ra<sub>1</sub>** Radius of the volcanic cone 1; **Ra<sub>2</sub>** Radius of the volcanic cone 2; **S<sub>p</sub>** Subsidence at depth; **S<sub>s</sub>** Subsidence at surface; **t** Duration of the experiment; **V** Total extruded volume of water from the balloon. \_\_\_\_\_ 328

**Table 4.3:** Sections of tables 3.10 and 3.13. List of the analogue models reproduced numerically. **(A)** List of the input parameters of the considered analogue silicone models **(B)** Relevant measured or calculated parameters. **A** Silicone reservoir height; **D** Silicone reservoir diameter; **e** Silicone reservoir eccentricity defined as  $0.5 \times D/A$  ( $e = 1$  implies an hemispheric silicone reservoir); **EXT-W** Width of the external area of flexure and extension; **n.c.** No calculable or measurable value due to experimental reasons or visual problems; **N-D** Diameter of the non-deformed area; **OL-D** Diameter of the outer limit of the collapse; **R** Roof aspect ratio =  $P/D$ ; **S<sub>p</sub>** Subsidence at depth; **S<sub>s</sub>** Subsidence at surface; **T** Roof thickness; **t** Duration of the experiment. \_\_\_\_\_ 329

**Table 4.4:** List of the performed numerical models and the corresponding input parameters. All parameters remain constants except of the roof aspect ratio **R**. Axial symmetric models are indicated with the abbreviation “AS”. **- $\Delta P$**  Magma chamber underpressure; **D** Magma chamber diameter; **H** Magma chamber height; **P** Magma chamber depth; **R** Roof aspect ratio. \_\_\_\_\_ 357