





ISSN 1514 - 4836  
ISSN 1668 - 3242 en línea

**INSTITUTO SUPERIOR DE CORRELACIÓN GEOLÓGICA  
(INSUGEO)**

Miscelanea 18

***ELEMENTOS BASICOS DE  
PETROLOGIA IGNEA***

Alejandro José TOSELLI

---

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo  
Universidad Nacional de Tucumán  
San Miguel de Tucumán  
2009-2010

# CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS

Universidad Nacional de Tucumán

## Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO)

**Director:** Dr. Florencio G. Aceñolaza

**Director alterno:** Dr. Alejandro Toselli

**Editor:** Dr. Florencio Gilberto Aceñolaza

**Coordinador Editorial:** Dr. Carlos A. Cónsole Gonella

### **Consejo Editor:**

Dr. Alejandro J. Toselli (INSUGEO), Dr. Alfredo Tineo (INSUGEO), Dr. Víctor Ramos (Buenos Aires), Dr. Rafael Herbst (INSUGEO), Dra. Juana N. Rossi de Toselli (INSUGEO), Dra. Susana B. Esteban (INSUGEO), Dr. Guillermo F. Aceñolaza (INSUGEO), Dr. M. Franco Tortello (Univ. La Plata), Dr. Carlos Cingolani (Univ. La Plata), Dr. Roberto R. Lech (CENPAT-Trelew), Dr. Ricardo Alonso (Univ. Salta), Dra. Beatriz Coira (Univ. Jujuy), Dr. Juan Carlos Gutiérrez-Marco (CSIC-España), Dra. Isabel Rábano (IGME-España), Dr. Julio Saavedra Alonso (CSIC-España), Dr. Hübert Miller (Univ. München - Alemania), Dr. Alcides N. Sial (Univ. Pernambuco-Brasil), Dra. Valderez Ferreira (Univ. Pernambuco-Brasil), Dra. Renata Guimaraes Netto (UNISINOS - Brasil), Dr. Claudio Gaucher (Univ. Montevideo – Uruguay).

### **Dirección:**

Instituto Superior de Correlación Geológica. Miguel Lillo 205. CP 4000 San Miguel de Tucumán. Argentina. E-mail: [insugeo@csnat.unt.edu.ar](mailto:insugeo@csnat.unt.edu.ar) – Página web: [www.insugeo.org.ar](http://www.insugeo.org.ar)

## Miscelánea INSUGEO

Esta Serie es editada por el INSUGEO con el objeto de dar a conocer información de interés geológico y del medio ambiente, siendo los trabajos allí publicados representativos y puntuales. Ella incluye guías de campo, resúmenes de reuniones científicas y monografías vinculadas al objetivo principal. Se requiere que los manuscritos sean remitidos en apoyo informático y papel; las ilustraciones de igual manera en caja 13X20 cm y con buen contraste. Todos los trabajos tienen revisores y también son puestas en consideración del Consejo Editor. Gran parte de este material puede consultarse gratuitamente y obtener en la página Web del INSUGEO: [www.insugeo.org.ar](http://www.insugeo.org.ar). Esta colección está referenciada en Latindex, EBSCO, Ulrich International Periodical Directory, Thomson Reuters ISI, Zoological Record, Gale Cengage Learning y Georef, Directory of Open Access Journals DOAJ. Integra el Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentina.

*Miscelánea Insugeo n° 1:* Colección de Paleontología Lillo. Catálogo de fósiles publicados 1970-1993

*Miscelánea Insugeo n° 2:* Lower Paleozoic of Tarija Región, Southern Bolivia (agotado)

*Miscelánea Insugeo n° 3:* Actividad desarrollada durante los años 1991-1993 (agotado)

*Miscelánea Insugeo n° 4:* The Jurassic and Cretaceous terrestrial beds from Southern Neuquén Basin, Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 5:* Cuadro general de la ciudad de Paraná

*Miscelánea Insugeo n° 6:* Cambrian from the Southern Edge

*Miscelánea Insugeo n° 7:* The Ordovician of Mendoza

*Miscelánea Insugeo n° 8:* Ordovician / Silurian sections in the Precordillera, western Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 9:* Cambro / Ordovician sections in NW Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 10:* Ordovician and Silurian of the Precordillera, San Juan Providence, Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 11:* Ordovician and Silurian of the Cordillera Oriental and Sierras Subandinas, NW Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 12:* Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino I

*Miscelánea Insugeo n° 13:* Simposio Bodenbender

*Miscelánea Insugeo n° 14:* Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino II

*Miscelánea Insugeo n° 15:* Textura y estructura de las Rocas Igneas

*Miscelánea Insugeo n° 16:* Historia de la Geología Argentina

*Miscelánea Insugeo n° 17 (1):* Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino III

*Miscelánea Insugeo n° 17 (2):* Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino III

**Instituto Superior de Correlación Geológica  
Miguel Lillo 205 – San Miguel de Tucumán – República Argentina**

# ELEMENTOS BASICOS DE PETROLOGIA IGNEA

## INDICE

Prólogo .....	12
Abstract - Resumen .....	13
Agradecimientos .....	14
<b>1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES</b>	
Introducción .....	15
Criterios de campo .....	15
Criterios texturales .....	15
Depósitos piroclásticos .....	15
Interpretación de las rocas ígneas .....	16
El interior de la Tierra .....	16
Origen del sistema solar y de la Tierra .....	19
Diferenciación de la Tierra .....	21
¿Cómo se han logrado estos conocimientos? .....	22
Meteoritos .....	23
Variaciones de presión y temperatura con la profundidad .....	25
Gradientes de Presión .....	26
Gradientes de Temperatura .....	27
<b>2. CLASIFICACION Y NOMENCLATURA DE LAS ROCAS IGNEAS</b>	
Introducción .....	29
Términos composicionales .....	29
Índice de color .....	30
Clasificación de la IUGS .....	30
Rocas faneríticas .....	31
Nomenclatura de la figura 2-1 (QAPF plutónicas) .....	32
Términos modificatorios .....	33
Rocas máficas y ultramáficas .....	34
Nomenclatura de la figura 2-5 (QAPF volcánicas) .....	36
Rocas piroclásticas .....	36
Clasificaciones químicas .....	37
En la norma CIPW (ver anexo I) .....	38
La clasificación TAS .....	38
Concepto de saturación .....	40
<b>3. TEXTURAS</b>	
Introducción .....	43
Texturas primarias (Interacción fundido-cristal) .....	44
Lugares preferenciales de nucleamiento .....	49
Reacción y resorción magmática .....	52
Movimientos diferenciales de cristales y fundido .....	52
Texturas cumuláticas .....	53
Maclas primarias .....	54
Fábricas volcánicas .....	54
Fábricas piroclásticas .....	57
Texturas secundarias (cambios postmagmáticos).....	58
Transformaciones polimórficas .....	59
Maclas secundarias .....	60
Reacciones secundarias y de reemplazo .....	61
Deformación .....	63
<b>4. PROCESOS VOLCÁNICOS</b>	
Introducción .....	65
Vulcanismo Hawaiano o en Escudo .....	66
Vulcanismo Estromboliano .....	67
Vulcanismo Vulcaniano .....	67
Vulcanismo Peleano .....	68
Vulcanismo Pliniano .....	69
Comportamiento del material eyectado .....	69

Lavas pahoehoe o cordadas .....	69
Lavas AA o escoriaceas .....	70
Lavas pillow o almohadilladas .....	71
Lavas submarinas .....	71
Domos de lava .....	72
Rocas piroclásticas .....	73
Eventos piroclásticos pequeños .....	75
Caidas de cenizas .....	76
Flujos de cenizas .....	77
Lahars .....	78
Hialoclastitas .....	78
Depósitos piroclásticos laminares .....	78
Cráteres y calderas .....	79
Super-volcanes y super-erupciones explosivas .....	80
Super-volcán .....	80
Super-erupción .....	80
Reservorios magmáticos que alimentan a las super-erupciones .....	81
Calderas .....	83
Grandes provincias ígneas - LIPs. ....	85
Plateau basálticos oceánicos .....	85
Plateau de basaltos continentales .....	86
Origen de los magmas .....	87
Ruptura continental .....	87

## 5. CUERPOS INTRUSIVOS O PLUTONICOS

Introducción .....	91
Cuerpos laminares .....	91
Cuerpos globosos .....	94
Relaciones de contacto de los plutones .....	95
Tiempo de intrusión .....	97
Profundidad de los intrusivos .....	97
Inyecciones múltiples y plutones zonados .....	100
Los procesos de ascenso del magma y emplazamiento y el problema del espacio .....	100

## 6. REGLA DE LAS FASES: SISTEMAS DE UNO Y DOS COMPONENTES

Introducción .....	103
Fases en equilibrio y regla de las fases .....	104
Clasificación de los sistemas .....	106
Sistemas de un solo componente .....	106
Fusión Congruente .....	106
Sistema Sílice .....	107
Fusión incongruente .....	108
Sistemas de dos componentes .....	109
Sistemas de tipo eutéctico .....	109
Sistema diópsido-anortita .....	109
Fusión en equilibrio .....	111
Cristalización fraccionada .....	111
Fusión parcial en equilibrio .....	111
Disolución sólida completa .....	112
Sistema de las plagioclasas .....	112
Zoneado composicional .....	113
Fusión de equilibrio incongruente .....	114
Fusión fraccionada .....	114
Sistema forsterita-fayalita .....	114
Fusión incongruente .....	115
Sistemas peritéticos binarios .....	115
Sistema Forsterita-sílice .....	115
Cristalización fraccionada .....	117
Relaciones de fusión .....	117
Desmezcla de disoluciones sólidas .....	118
Sistema de los feldespatos alcalinos .....	118

## 7. SISTEMAS DE TRES COMPONENTES

Introducción .....	123
Sistemas eutécticos ternarios (Anortita-Forsterita-Diópsido) .....	123
Cristalización fraccionada .....	124
Fusión en equilibrio .....	125
Fusión parcial .....	125
Sistema ternario peritético (Anortita-Forsterita-Sílice) .....	125
Cristalización fraccionada .....	127
Sistemas ternarios con solución sólida (Diópsido-Albita-Anortita) .....	127
Sistemas con más de tres componentes (Albita-Anortita-Diópsido-Forsterita) .....	129
Serie de reacción .....	130
Efectos de la presión sobre el comportamiento de los fundidos .....	131
Efectos de los fluidos con el comportamiento de los fundidos .....	131
Inclusiones fluidas .....	132
Los efectos del agua .....	133
Rol del agua en el comportamiento magmático .....	134
Controles sobre las erupciones volcánicas explosivas .....	136
Ebullición retrógrada: estadios tardíos de sistemas magmáticos confinados .....	136
Sistemas hidrotermales .....	137
Isótopos y los sistemas convectivos de agua meteórica .....	139
Efectos del anhídrido carbónico .....	139
Componentes volátiles .....	140

## 8. PETROLOGÍA QUÍMICA: ELEMENTOS MAYORES Y MENORES

Introducción .....	143
Minerales normativos .....	144
Diagramas de variación .....	146
Proyecciones bivariantes .....	146
Índice de diferenciación (Thornton y Tuttle) .....	149
Índice de cristalización (Poldevaart y Parker) .....	150
Comentarios .....	151
Diagrama triangular AFM .....	152
Diagramas de variación para modelar la evolución magmática .....	152
Relación entre elementos de Pearce .....	153
Modelos gráficos y matemáticos de evolución magmática .....	154
Serie de magmas .....	158

## 9. PETROLOGIA QUIMICA II: ELEMENTOS TRAZAS E ISOTOPOS

Introducción .....	165
Distribución de los elementos .....	165
Modelos de procesos sólido-fundido .....	168
Baño de fusión .....	168
Fraccionamiento Rayleigh .....	169
Las tierras raras: un grupo especial de elementos trazas .....	170
Diagramas Spider o Multielementos .....	171
Aplicación de los elementos trazas a sistemas ígneos .....	172
Criterios geoquímicos para discriminar entre ambientes tectónicos .....	175
Isótopos .....	176
Isótopos de oxígeno .....	176
Isótopos de Potasio y Argón .....	177
Isótopos de Rubidio y Estroncio .....	177
Isótopos de Samario y Neodimio .....	180
Sistemas Uranio, Torio y Plomo .....	182
Sistema Lutecio y Hafnio .....	184
Sistema de Renio y Osmio .....	185

## 10. MAGMAS

Introducción .....	187
Composición de los magmas .....	188
Propiedades físicas de los magmas .....	189
Temperaturas .....	189
Naturaleza físico-química de los líquidos silicáticos .....	191



Viscosidad .....	192
Efectos del enfriamiento en la cristalización .....	194
Densidad .....	196
Tiempo requerido para la cristalización .....	197
Ascenso del magma a través del manto y de la corteza .....	197
Transferencia de masa y energía por difusión .....	199
Convección .....	200
Diferenciación magmática .....	202
Clasificación de los procesos de diferenciación .....	202
Sistemas que involucran sólo líquidos .....	203
Sistemas que involucran sólidos y líquidos .....	203
Sistemas que involucran líquido y vapor .....	204
Sistemas que involucran líquido, sólido y vapor .....	204
Asimilación magmática .....	204
Reacciones con las rocas de caja .....	204
Asimilación .....	205
Rocas híbridas .....	207
Mixing – mezcla homogénea .....	208
Mingling – mezcla heterogénea.....	208
Alteración post-solidificación .....	208
Generación del magma .....	209
Fusión parcial .....	211
<b>11. ROCAS PLUTONICAS</b>	
Introducción .....	213
Categorías de granitos .....	213
Parámetros geoquímicas .....	215
Cinturón batolítico mesozoico andino .....	217
Elementos trazas característicos de los granitos .....	217
Caracterización según participación del manto y corteza .....	219
Granitos en zonas de colisión continente-continente .....	220
Granitos tipo-A .....	221
Petrogénesis .....	222
Clasificación geotectónica de los granitos .....	224
Pegmatitas .....	224
Petrogénesis .....	225
<b>12. DORSALES OCEANICAS</b>	
Introducción .....	229
Naturaleza de la corteza oceánica .....	231
Zona de fallas transformantes .....	231
Dorsales asísmicas .....	231
Flujo calórico y sistemas hidrotermales.....	232
Metamorfismo del fondo oceánico. ....	232
Basaltos de las dorsales medio-oceánicas (MORB). ....	232
Composición química.....	233
Origen de los magmas MORB y su fuente mantélica .....	235
Reservorios mantélicos .....	237
Modelos petrogenéticos .....	237
Ofiolitas .....	240
Introducción .....	240
Características distintivas.....	240
Origen y emplazamiento.....	241
Serpentinización .....	244
<b>13. MAGMATISMO DE INTRAPLACA</b>	
Introducción .....	245
Islas oceánicas .....	246
Procesos de fusión parcial .....	246
Cámaras de magma en altos niveles .....	248
Petrografía de las rocas volcánicas de islas oceánicas.....	248
Composición química .....	249

Elementos mayores .....	250
Elementos trazas y tierras raras .....	251
Isótopos radiogénicos .....	253
Modelo petrogenético .....	255
Profundidad de segregación de los magmas .....	255

#### **14. FLUJOS BASALTICOS CONTINENTALES**

Introducción .....	257
Petrografía de las rocas volcánicas .....	257
Composición química .....	260
Elementos trazas .....	260
Isótopos radiogénicos .....	261
Modelos petrogenéticos .....	262

#### **15. MAGMATISMO EN MARGENES ACTIVOS DE PLACAS**

Introducción .....	265
Arcos de islas oceánicas .....	265
Estructura de los arcos de islas .....	267
Estructura térmica y procesos de fusión parcial .....	267
Segregación, ascenso y almacenamiento del magma .....	268
Características de las series de magmas .....	269
Petrografía de las volcanitas .....	271
Variaciones temporales y espaciales del magmatismo de arco .....	271
Composición química de los magmas .....	272
Identificación de los magmas primarios .....	273
Contenidos de volátiles .....	274
Isótopos radiogénicos .....	274
Modelos petrogenéticos .....	275

#### **16. MAGMATISMO DE MARGENES CONTINENTALES ACTIVOS**

Introducción .....	279
Estructura de los márgenes continentales activos .....	280
Reservorios de magma en la corteza .....	281
Características petrográficas de las rocas volcánicas y plutónicas .....	283
Andesitas .....	283
Riolitas .....	285
Composición química de los magmas .....	286
Elementos mayores .....	287
Elementos trazas .....	288
Isótopos radiogénicos .....	288
Modelos petrogenéticos .....	289

#### **17. MAGMATISMO EN CUENCAS DE RETRO-ARCO**

Introducción .....	293
Petrografía de las rocas volcánicas .....	295
Composición química de los magmas .....	295
Elementos mayores .....	295
Elementos trazas .....	296
Isótopos radiogénicos .....	297
Modelo petrogenético .....	297

#### **18. MAGMATISMO POTASICO DE INTRAPLACA**

Introducción .....	301
Kimberlitas .....	302
Petrografía de las kimberlitas .....	303
Lamproitas .....	304
Rocas melilíticas .....	305
Lamprófiros .....	305
Composiciones químicas de kimberlitas, lamproitas y lamprófiros .....	306
Elementos mayores .....	306
Elementos trazas .....	310
Isótopos radiogénicos .....	311

Modelos petrogenéticos .....	312
Origen de los magmas y relación con los diamantes .....	316

**19. MAGMATISMO DE RIFT CONTINENTAL**

Introducción .....	319
Petrografía .....	320
Composición química .....	320
Elementos mayores .....	320
Elementos trazas .....	322
Isótopos radiogénicos .....	323
Modelo petrogenético .....	325
Carbonatitas .....	328
Introducción .....	328
Origen de las carbonatitas .....	329

**20. INTRUSIONES MAFICAS BANDEADAS (LIMs)**

Introducción .....	333
Intrusiones básicas .....	333
Diques y filones capa diferenciados .....	334
Grandes intrusiones diferenciadas bandeadas .....	334
Propiedades.....	335

**21. ANORTOSITAS**

Introducción .....	339
Anortositas .....	339
Modelo de generación de anortositas –tipo masivo .....	341
Charnoquitas .....	343

Anexo I .....	345
Anexo II .....	351
Anexo III .....	353

## PRÓLOGO

El propósito de este libro ha sido combinar las relaciones geológicas de campo, con los avances en experimentos de laboratorio sobre la forma de originarse las rocas ígneas y la experiencia en el dictado de clases de la carrera de Geología de Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán, durante más de cuarenta años.

He intentado resumir e integrar los procesos petrogenéticos con las asociaciones de rocas, que se sostienen sobre la base de los ambientes geotectónicos condicionados por la tectónica de placas.

El libro ha sido escrito pensando en los estudiantes de Geología y de Ciencias Naturales, como así también en profesionales que tengan que resolver problemas relacionados con la dinámica que significan los complejos y asociaciones de rocas, con desarrollo de una base simple, pero firme, para avanzar en estudios más profundos y complejos en la interpretación de la fenomenología genética del magmatismo.

Todos reconocerán al leer este libro que se toma, de la bibliografía existente, enorme cantidad de material, como los resultados de los experimentos de laboratorio, las clasificaciones de rocas (mineralógicas y químicas), las asociaciones de rocas, tratando de integrar en forma coherente toda dicha información, con miras a lograr un desarrollo conceptual de la problemática magmática.

Muchas de las ilustraciones, gráficos y fotografías son nuevas y otras son adaptaciones de otras ya publicadas, que por su valor didáctico han sido parcialmente modificadas, adaptadas e incluidas, como complemento adecuado al texto.

## **ABSTRACT**

In this book "Basic Elements on Igneous Petrology", develop key concepts for understanding the origin, evolution and characterization of igneous rocks. It is organized into chapters starting with the concepts of the structure and differentiation of the Earth, its formation as part of the solar system and the meaning of meteorites, as well as changes in pressure and temperature with increasing depth our planet.

We continue with the classifications and nomenclature of igneous rocks, using mineralogical and chemical schemes, effective and textural classifications and in the form of lying in the field, marking the evolutionary differences between volcanic and plutonic processes.

The concept of the phase rule is applied to different petrological systems that explain experimentally the mineral assemblages and textures in the rocks that rise up.

The chemical compositions of rocks, including the major elements, minor and trace, are used to explain the variation diagrams, which serve to explain the evolution experienced by magmas to crystallize, leading to the formation of associations of rocks. This includes radioactive and stable isotopes are commonly used in genetic interpretations. This enters the concept of magma and dynamic phenomena that take place during ascent and consolidation, either as intrusive or volcanic outcroppings, with their relations with the rocks it passes through. Are outlined different geotectonic environments that give rise to magmas by partial melting and define their primary character.

So we arrived, after considering the tools to be used, to different groups of rocks, starting with the different groups of granites and their classifications, following by the basalts of mid-ocean ridges and within plates magmatism, continental flood basalt provinces, active continental margins, and back-arc basins. To these are added potassic within continental plates, corresponding to the continental rift zone magmatism, the carbonatites, kimberlites, ophiolites, mafic banded intrusions, and anorthosites.

## **RESUMEN**

En este libro "Elementos Básicos de Petrología Ígnea", se desarrollan los conceptos fundamentales para entender el origen, evolución y caracterización de las rocas ígneas. Para ello se lo ha organizado en capítulos comenzando con los conceptos de la estructura y diferenciación de la Tierra, su formación como parte del sistema solar y el significado de los meteoritos; así como los cambios de presión y de temperatura con el aumento de profundidad en nuestro planeta.

Continuamos con las clasificaciones y nomenclatura de las rocas ígneas, utilizando los esquemas mineralógicos y químicos, en vigencia, así como las clasificaciones texturales y según la forma de yacer en el campo, marcando las diferencias evolutivas entre los procesos volcánicos y los plutónicos.

El concepto de la regla de las fases es aplicada a los diferentes sistemas petrológicos, que explican experimentalmente las asociaciones minerales y las texturas que originan en las rocas que integran.

Las composiciones químicas de las rocas, incluyendo los elementos mayores, menores y trazas, son utilizadas para explicar los diagramas de variación, que sirven para explicar la evolución que sufren los magmas al cristalizar, dando lugar a la formación de las diferentes asociaciones de rocas. Aquí se incluyen los isótopos radiactivos y estables que son utilizados normalmente en las interpretaciones genéticas. Con esto se accede al concepto de magma y los fenómenos dinámicos que tienen lugar durante su ascenso y consolidación, ya sea como

cuerpos plutónicos o efusiones volcánicas, junto a sus relaciones con las rocas que atraviesa. Se esquematizan los distintos ambientes geotectónicos que dan origen a los magmas por fusión parcial y definen sus caracteres primarios.

Así llegamos, después de haber considerado las herramientas que deben ser utilizadas, a los diferentes grupos de rocas, comenzando por los diferentes grupos de granitos y sus clasificaciones, siguiendo por los basaltos de las dorsales oceánicas y de intraplaca en áreas oceánicas, los flujos basálticos continentales, el magmatismo de márgenes continentales activos y de las cuencas de retro-arco. A estos se agregan el magmatismo potásico de intraplaca, el correspondientes a zonas de rift continental, las carbonatitas, las intrusiones máficas bandeadas y las anortositas.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mi esposa Dra. Juana N. Rossi por los constantes comentarios y críticas que llevaron a expresar con claridad los temas desarrollados, lo mismo a los colegas que permanentemente me alentaron a terminar el libro.

Mi reconocimiento a la Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán y al Instituto Superior de Correlación Geológica del CONICET, por la colaboración institucional para alcanzar esta meta.

También hago llegar mi reconocimiento a los alumnos de los cursos de grado de la carrera de geología, que durante años utilizaron los apuntes de cátedra, que llevaron finalmente a la concreción de esta obra.