



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Doctor en Geología

“Influencia de la mineralogía, textura y grado de alteración de rocas volcánicas en su comportamiento como agregado en hormigón”

Lic. LenísMadsen

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2018

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geología, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la cátedra de Geoquímica, dependiente del Departamento de Geología de la UNS durante el período comprendido entre el 21 de abril del 2015 y el 19 de diciembre del 2018, bajo la dirección de la Dra. Silvina Andrea Marfil (Profesor Titular UNS – Investigador Principal CIC) y del Dr. Ing. Claudio Rocco (Profesor Titular UNLP).

Fecha:

Departamento de Geología

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

“Si lo puedes soñar, puedes hacerlo...
Piensa, crea, sueña y atrévete”.

Walt Disney

Agradecimientos

A familia incondicional... mamá, papá y hermana por apoyarme y confiar siempre en mi, en mi carrera de grado y en todo el doctorado.

A mis amigas del alma por estar siempre para lo que necesité y porque sin duda fueron lo mejor que me dio la geología.

A la Universidad Nacional del Sur y a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Prov. de Buenos Aires por el apoyo brindado.

A la Dra. Silvina Marfil, por su dirección, su paciencia e incansable predisposición para todo.

Al Dr. Pedro Maiza, por enseñarme todo y más de lo que necesitaba, las charlas, los mates y respuestas para todo.

Al Dr. Claudio Rocco, por su codirección y apoyo a lo largo de estos años.

Agradezco profundamente al Dr. Francisco Locati y a la Dra. Gilda Collo, del CICTERRA (CONICET-UNC), por regalarme de su tiempo y sus conocimientos para que esto fuera posible.

A mis compañeras de oficina Leti y Pauli, por el día a día, las charlas, los mates, los consejos y más.

A Ing. Darío Falcone, del LEMIT- CIC, que dedicó su tiempo, sus meticulosos libros y estuvo presente en toda mi tesis, realizando todos los ensayos. A Rodolfo Salomón por sus mates y su apoyo en los estudios realizados.

A PROMIN S.A., LUIS LOSI S.A., y POLAN S.A, por permitirme el acceso a las canteras y el continuo interés en el avance de mis estudios.

A la Dirección Nacional de Vialidad por el apoyo brindado.

Y si me preguntan, cuál fue la parte más difícil de la tesis? Diría: esta!

Es imposible expresar en palabras el esfuerzo que cada una de estas personas hizo, el apoyo incondicional de muchos, el aporte de todos... el empuje que cada uno de su lado te da, los consejos... el ejemplo! Seguramente y aunque lo haya pensado, me olvide de alguien, pero a cada unos ustedes les voy a dar un fuerte abrazo y les voy a decir ¡Gracias!

Gracias por todo!

Resumen

El hormigón es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial para la construcción de obras tales como, rutas, túneles, presas. Sin embargo existen patologías que pueden afectar sus propiedades mecánicas, físicas y su durabilidad. En 1940 se dieron a conocer los primeros estudios de una reacción química (denominada reacción álcali-sílice), desarrollada entre algunos materiales silíceos que constituyen los agregados pétreos y los hidróxidos alcalinos provenientes principalmente del cemento. A pesar de los años de investigación actualmente continua siendo un tema de debate, estudio y constante avance tecnológico. En Argentina, en las provincias de Entre Ríos y Corrientes, existen numerosas canteras donde se explotan agregados para hormigón. Estas rocas, de origen basáltico, pueden contribuir al desarrollo de la reacción debido a la presencia de cierto tipo de compuestos potencialmente reactivos. En esta Tesis se relevaron cinco canteras activas de ambas provincias para evaluar la reactividad alcalina potencial de estos agregados. Se realizaron ensayos normalizados, tales como el método de la barra de mortero (IRAM 1674), prisma de hormigón convencional y acelerado (IRAM 1700, a 38°C y 60°C), análisis petrográfico (IRAM 1649, 1531) y se determinó la sílice disuelta (IRAM 1650). Sobre las barras de mortero y prismas de hormigón, luego de cumplido el tiempo de ensayo, se realizaron secciones delgadas que se estudiaron mediante microscopía óptica, para identificar productos de neoformación, y microscopía UV para evaluar el grado de microfisuramiento. Los estudios permitieron identificar materiales potencialmente reactivos, como por ejemplo vidrio volcánico, polimorfos de la sílice y calcedonia, y sustancias perjudiciales como la montmorillonita. En algunas canteras estos componentes superaron el límite establecido por la norma, calificando a los agregados como potencialmente reactivos según el examen petrográfico. La expansión medida en prismas de hormigón arrojaron valores diferenciales calificando algunos agregados como potencialmente reactivos y otros inocuos, mientras que en barras de mortero todos los valores superaron el límite establecido. También se estudiaron dos obras ingenieriles realizadas con agregados basálticos de la zona, que presentaban signos de RAS, con el objetivo evaluar la influencia de estos en el deterioro de la estructura.

Abstract

Concrete is one of the main materials used worldwide for the construction of different works such as routes, tunnels, dams. However, several pathologies can affect their mechanical and physical properties and their durability. In 1940 the first studies of a chemical reaction (named alkali-silica reaction (RAS)), developed between some siliceous materials that constitute the aggregates, and the alkaline hydroxides, coming mainly from the cement were studied. Despite the years of researches, nowadays it continues being subject of debate, study and permanent technological progress. In Argentina, in the provinces of Entre Ríos and Corrientes, there are several quarries of aggregates for concrete. These rocks are of basaltic origin and can contribute to the development of the reaction due to the presence of certain type of potentially reactive components. In this Thesis, five active quarries of both provinces were sampled to evaluate the potential the alkaline reactivity of these aggregates. Several standardized tests such as the mortar bar test method (IRAM 1674), conventional and accelerated concrete prism test method (IRAM 1700, at 38°C and 60°C) and petrographic analysis (IRAM 1531, 1649) were carried out. Also the dissolved silica (IRAM 1650) was determined. Thin sections were made of the mortar bars and concrete prisms after the test time was completed. They were studied by optical microscopy, to identify neoformation products, and by UV microscopy to evaluate the microcracking. The studies allowed to identify potentially reactive materials in this type of rock, such as volcanic glass, polymorphs of silica and chalcedony, and harmful substances such as montmorillonite. In some quarries these components exceeded the limit established by the standards, qualifying the aggregates as potentially reactive according to the petrographic examination. The expansion measured in concrete prisms shown differential values qualifying some aggregates as potentially reactive and other as innocuous, while in mortar bars all values exceed the limit established in the standard. Also, works elaborated with basaltic aggregates of the area, which showed signs of ASR, were studied in order to evaluate the influence of these rocks on the deterioration of the structures.

ÍNDICE

Agradecimientos

Resumen

Abstract

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos generales	2
1.1.1 Objetivos específicos	2
1.2 Organización de la Tesis	3

CAPÍTULO 2

MARCO REGIONAL Y GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Provincia geológica de la Mesopotamia	5
2.2 Geología del área de estudio	6
2.3 Clasificación de los basaltos según el tipo de magma	11

CAPÍTULO 3

LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE (RAS)

3.1. Reacción álcali-agregado (RAA)	16
3.1.1 Primeros trabajos relacionados con la RAA en el mundo	16
3.1.2 Primeros trabajos relacionados con la RAA en Argentina	18
3.2 Reacción álcali-agregado	20
3.2.1 Condiciones para que se desarrolle la RAS	22
3.2.1.1 <i>Presencia de álcalis</i>	22
3.2.1.2 <i>Humedad elevada</i>	24
3.2.1.3 <i>Agregados potencialmente reactivos</i>	25
3.2.1.4 <i>Temperatura</i>	27
3.2.1.5 <i>Influencia del calcio</i>	29
3.2.2 Mecanismos de la reacción	30

3.2.3 Efectos de la RAS	31
3.3 Influencia de agregados basálticos en la RAS	32
3.4 Normas utilizadas para evaluar la RAS	37

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales	44
4.1.1 Cantera L.A	45
4.1.2 Cantera L.M	48
4.1.3 Cantera L.D	50
4.1.4 Cantera Y	52
4.1.5 Cantera P.Y	55
4.2 Métodos	58
4.2.1 Ensayos normalizados	58
4.2.1.1 Examen petrográfico - IRAM 1649 (2008)	58
4.2.1.2 Agregado grueso para hormigón de cemento-IRAM 1531 (2012)	59
4.2.1.3 Método acelerado de la barra de mortero-IRAM 1674 (1997)	61
4.2.1.4 Método del prisma de hormigón-IRAM 1700 (2012)	62
4.2.1.5 Método acelerado del prisma de hormigón-IRAM 1700 (2012)	63
4.2.1.6 Método químico-IRAM 1650 (1968)	64
4.2.2 Otros métodos empleados	66
4.2.2.1 Estereomicroscopía	66
4.2.2.2 Microscopía de polarización	66
4.2.2.3 Microscopía UV	67
4.2.2.4 Difractometría de rayos X (DRX)	68
4.2.2.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)	68
4.2.2.6 Microanálisis con sonda de electrones	69
4.2.2.7 Análisis químicos de roca total	69

CAPÍTULO 5

RESULTADOS. Petrografía y Geoquímica

5.1 Petrografía	70
5.1.1 Cantera L.A	70
5.1.2 Cantera L.M	74
5.1.3 Cantera L.D	78
5.1.4 Cantera Y	81
5.1.5 Cantera P.Y	84
5.1.5.1 <i>Análisis de testigos de perforación</i>	87
5.2 Geoquímica	106
5.2.1 Elementos mayoritarios y minoritarios	106
5.2.2 Elementos traza	109
5.3 Clasificación de los basaltos en base a su composición química	113
5.4 Minerales de alteración	120
5.5 Consideraciones finales	125

CAPÍTULO 6

RESULTADOS. Reactividad Alcalina Potencial de las Rocas Estudiadas

6.1 Examen petrográfico	126
6.1.1 IRAM 1649 (2008)	126
6.1.1.1 <i>Cantera L.A</i>	126
6.1.1.2 <i>Cantera L.M</i>	128
6.1.1.3 <i>Cantera L.D</i>	130
6.1.1.4 <i>Cantera Y</i>	132
6.1.1.5 <i>Cantera P.Y</i>	133
6.1.2 IRAM 1531 (2012)	135
6.2 Determinación de la sílice disuelta	136
6.3 Ensayo acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (1997)	137
6.4 Estudio petrográfico sobre barras de mortero	138
6.5 Determinación del área fisurada con microscopía UV sobre barras de mortero a 28 días (IRAM 1674)	142

6.6 Evaluación de la reactividad potencial de la cantera “Y”	144
6.7 Ensayos de expansión sobre prismas de hormigón IRAM 1700 (2012)	
6.7.1 Método convencional del prisma de hormigón	146
6.7.2 Método acelerado del prisma de hormigón	147
6.8 Estudios sobre prismas de hormigón a 5 años de ensayo (IRAM 1700)	149
6.9 Determinación del área fisurada con microscopía UV sobre prismas de hormigón a 5 años de ensayo (IRAM 1700)	151
6.10 Consideraciones finales	154

CAPÍTULO 7

RESULTADOS. Casos de Estudio

7.1. Pavimento de hormigón urbano	157
7.1.1 Características de la obra e inspección visual	158
7.1.2 Características petrográficas y SEM-EDS	159
7.2 Pavimento de hormigón (aeropuerto de la ciudad de Corrientes)	163
7.2.1 Características de la obra e inspección visual	163
7.2.2 Características petrográficas y SEM-EDS	167
7.3 Discusión y consideraciones finales	169

CAPÍTULO 8

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

8.1 Consideraciones	170
8.1.1 Importancia de los estudios llevados a cabo	170
8.1.2 Petrografía y geoquímica de las rocas estudiadas	170
8.1.3 Reactividad de las muestras estudiadas y evaluación de las normativas	173
8.1.4 Casos de estudio	175
8.2 Conclusiones	176
8.3 Recomendaciones	178

REFERENCIAS	179
--------------------	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados a nivel nacional e internacional para la construcción en obras de diversa envergadura como viviendas, rutas, túneles, presas, etc. Es el material de mayor consumo en el mundo luego del agua, convirtiendo a esta industria en el usuario más importante de recursos naturales del planeta. Se espera que la demanda llegue a 18 billones por año para el 2050 (Brunatti y Souza, 2011). Las propiedades del hormigón se encuentran fuertemente influenciadas por las características físicas, mecánicas y durables del agregado con el que fue elaborado, el cual ocupa un volumen entre el 60% y el 75% del hormigón (70% a 85% de la masa) (Scanferla, 2010) y por tal motivo es indispensable la caracterización previa de la roca.

En el noreste de Argentina, región mesopotámica, es común el uso de rocas basálticas como agregado pétreo, provenientes de diversas canteras ubicadas en las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones, las dos primeras son objeto de estudio en esta investigación. Si bien estas rocas son aptas, por sus características físico-mecánicas, para ser utilizadas como agregado para hormigón, su composición mineralógica puede contener sustancias potencialmente reactivas frente a lo que se conoce como reacción álcali-sílice (RAS). Esta reacción, producto de la interacción de ciertos componentes del agregado pétreo en este caso de naturaleza silíceo (calcedonia, vidrio volcánico, cuarzo microcristalino, etc) y los álcalis del cemento, tiene un efecto deletéreo en la estructura del hormigón, que afecta en un breve lapso de tiempo su durabilidad y resistencia. Si bien en la actualidad se conoce cuáles son las condiciones para que se desarrolle, en ocasiones, el agotamiento de recursos naturales aptos y la mayor demanda por parte de la industria conduce inevitablemente a la utilización de agregados potencialmente reactivos.

1.1 Objetivos generales

En Argentina existen grandes afloramientos de rocas basálticas, distribuidos en diversas zonas, dentro de las cuales se destaca la región mesopotámica. Es frecuente su utilización como piedra partida en hormigones, para importantes obras ingenieriles en Argentina y en otros países de Sudamérica. Grandes obras como los diques de Yacyretá, Salto Grande, puentes, pavimentos de aeropuertos y rutas fueron construidas con este tipo de agregado.

Los basaltos son rocas volcánicas, de carácter básico (deficientes en sílice). Por ello, cuando fuese natural esperar de ellas un comportamiento inocuo, existen algunos antecedentes de RAS, en distintas partes del mundo (Australia, Islandia, Japón, Nueva Zelanda, Portugal) e incluso en nuestro país. Este tipo de rocas puede contener abundante cantidad de vidrio volcánico (fresco y/o alterado a minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita) cuya influencia, ante las distintas exigencias a las que son sometidas al ser usadas como agregados en hormigón, no ha sido aún evaluada en profundidad.

El objetivo de esta investigación es determinar la relación existente entre las características petrográfico-mineralógicas, químicas y físicas de los basaltos de cinco canteras de las provincias de Entre Ríos y Corrientes, y su comportamiento frente a la RAS cuando son utilizados como agregado para hormigón.

1.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar y calificar, mineralógica y geoquímicamente las rocas basálticas de las principales canteras de las provincias de Entre Ríos y Corrientes.
- Investigar el comportamiento de estas rocas ante la reacción álcali-sílice (RAS), considerando principalmente el vidrio volcánico y la influencia de la presencia de

arcillas expansivas, utilizando métodos de ensayo físicos (barras de mortero y prismas de hormigón acelerado y convencional), químicos y petrográficos.

- Caracterizar los minerales potencialmente deletéreos y los productos de neoformación desarrollados en las barras de mortero y prismas de hormigón luego de cumplido el tiempo de ensayo.
- Evaluar la incidencia del uso de estas rocas en el debilitamiento de las estructuras investigando su comportamiento en el tiempo, mediante el estudio in situ de obras de hormigón de la región, especialmente aquellas que presenten patología RAS.
- Evaluar y aportar evidencias respecto al desempeño de las normativas actuales en la caracterización de este tipo de agregados frente a la RAS.

1.2 Organización de la Tesis

La Tesis se divide en nueve Capítulos. El Capítulo 1 sirve de introducción, se presentan los conceptos fundamentales relacionados con el fenómeno de la reacción álcali-sílice, y se plantean los objetivos generales y específicos de la investigación. El Capítulo 2 describe el marco geológico regional y el área de estudio local dentro de la región mesopotámica. El Capítulo 3 presenta una revisión bibliográfica sobre la reacción álcali-sílice, se describe el fenómeno, los mecanismos y los factores más importantes que influyen en su desarrollo y sus principales manifestaciones. Por último se hace una breve reseña sobre las normativas tanto a nivel nacional como internacional que se utilizan para evaluar la RAS.

El Capítulo 4 indica la ubicación y forma de muestreo de las diferentes canteras relevadas. También se detallan los métodos y técnicas utilizados en la investigación para evaluar la potencial reactividad de las rocas estudiadas y su comportamiento como agregado en el hormigón.

Los Capítulos 5, 6 y 7 están abocados a los resultados de la investigación. En el Capítulo 5 se presentan los análisis petrográficos y geoquímicos de las rocas estudiadas, realizando una descripción comparativa de detalle, y se clasifican los basaltos en base a su composición, a partir de estudios regionales de la cuenca Paraná. El Capítulo 6 corresponde a los resultados de los ensayos normalizados, en conjunto con otras técnicas, para definir la potencial reactividad frente a la RAS. En el Capítulo 7 se presentan dos casos de estudio de obras de hormigón realizadas con agregados de la región estudiada, que evidencian la RAS.

Por último, en el Capítulo 8 se plantean las consideraciones finales y se exponen las conclusiones que surgieron durante la investigación.

Además, se presenta de manera detallada y unificada las referencias bibliográficas citadas a lo largo de la tesis.

CAPÍTULO 2

MARCO REGIONAL Y GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Provincia geológica de la Mesopotamia

La Mesopotamia (del griego meso: medio y potamos: río) es una región geográfica de la República Argentina que abarca las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos, y se encuentra delimitada por los ríos Paraná, Uruguay e Iguazú, lo que le otorgó características de unidad aislada respecto del resto del país. Esta unidad geológica corresponde a la llamada Meseta Misionera (Frenguelli, 1946) y al área estable adyacente desarrollada entre los ríos mencionados y que fuera formalizada como unidad geológica con esta denominación a partir de la propuesta de Groeber (1938) (Figura 2.1). Su territorio abarca 196.781km², comprende una parte de la cuenca de Paraná que está ampliamente expuesta en Brasil, Paraguay y Uruguay. En territorio argentino esta cuenca tiene un sector donde afloran rocas mesozoicas y terciarias, principalmente en la meseta misionera, extendiéndose en el subsuelo hasta los límites reconocidos en la cuenca Chacoparanense (Chebli *et al.*, 1999).



Figura 2.1. Principales rasgos de la Mesopotamia argentina.

2.2 Geología del área de estudio

El conocimiento de la geología en subsuelo en la región mesopotámica históricamente ha sido pobre, debido a los escasos afloramientos y a la gran extensión de la cuenca. Existen varias perforaciones en la región aunque la mayoría no supera los 150 metros de profundidad, en el lado este de Corrientes, algunos pozos más profundos como: Guaviraví, Yapeyú o el denominado CuruzúCuatiá alcanzaron los 1.000m. El análisis de esta información, en conjunto con los datos en superficie de Paraguay, Uruguay y Brasil y registros sísmicos permitió, en parte, reconstruir el marco estructural de la región.

La caracterización morfológica y evolución de los depocentros receptores de la sedimentación paleozoica y mesozoica aún mantienen importantes indefiniciones, justamente en la zona de transición entre los dos grandes ambientes tradicionalmente definidos: la Cuenca Paraná, al este (Fulfaro *et al.*, 1982; Zalán *et al.*, 1990; Milani, 1997) y la Cuenca Chacoparanense al oeste (Russo *et al.*, 1979; Pezzi y Mozetic, 1989; Chebli *et al.*, 1999; Urien, 2003, entre otros). La reconstrucción del llamado “Arco de Asunción” o “Dorsal Asunción” a partir del Paleozoico Superior ha sido un elemento tectónico de primera magnitud en el desarrollo paleogeográfico que controló la depositación de las secuencias sedimentarias y que permitió delimitar la extensión de las cuencas Paraná y Chacoparanense. A partir de entonces, las cuencas comenzaron a evolucionar más independientemente al punto de exhibir depocentros aislados pero cronoestratigráficamente equivalentes (Rossello *et al.*, 2016).

En Argentina, los primeros registros corresponden a rocas del Paleozoico Inferior, que se han registrado en el lado noreste de la cuenca, con más de 2.000m espesor (Mira *et al.*, 2015) asignado a las formaciones Árbol Blanco, Pirané y Zapla (Grupo Río Ivaí, en Brasil) (Chebli *et al.*, 1999). Posteriormente con los movimientos del Ordovícico Superior - Silúrico Inferior (Oclóyicos) es posible que haya existido una homogeneización de la cuenca entre la región sur de Brasil y el área argentina.

Los primeros registros sedimentarios de las cuencas de Paraná y Chacoparanense comenzaron durante el Cámbrico-Ordovícico y el Silúrico, se presentan en ambas cuencas como un ciclo regresivo y transgresivo con una distribución más amplia que los sedimentos silúricos. En Brasil con las Fm. Furnas y Ponta Grossa con espesores de 850m; en Uruguay los espesores no superan los 300m promedio (Bossi, 1966). Del lado argentino esos depósitos se extienden por más de 400km con geometría en forma de cuña al sureste; al noreste los límites no son claros (Russo *et al.*, 1979; Chebli *et al.*, 1999). Sobre ésta, en territorio brasileño, se depositaron sedimentos marinos arenosos y limosos, parcialmente bituminosos de la Fm. Ponta Grossa cuya extensión continua hacia el oeste, constituyendo el subsuelo misionero (França *et al.*, 1995).

La sedimentación temprana durante el Carbonífero-Pérmico tiene amplios registros sedimentarios con influencia glacial, con clara representación en ambas cuencas, seguidas por un evento transgresivo marino y una continentalización progresiva (Mira *et al.*, 2015). La discordancia Devónico-Carbonífero está bien representada en ambas cuencas aunque el hiato podría ser diferente (López-Gamundí y Rossello, 1993; Milani, 1997). En la cuenca Chacoparanense, la glaciación gondwánica tiene su expresión en la formación Sachayoj (Carbonífero Medio a Superior) representada en subsuelo por arcilitas de color castaño a grisáceo, hacia arriba se reconocen los sedimentos glaciares y fluvio-glaciares con intercalaciones de tillitas de la Fm. Charata (Carbonífero Superior). Durante el Pérmico Inferior, depósitos marinos epicontinentales cubrieron las cuencas Paraná y Chacoparanense y otras partes occidentales de las cuencas de Gondwana, representado por arcilitas y limolitas post-glaciares de la Fm. Chacabuco (Pérmico Inferior) que culminan la secuencia neopaleozoica. El levantamiento general de las áreas cratónicas, en respuesta a la tectónica de compresión en el margen occidental, en el Pérmico tardío dio lugar a la continentalización de estas áreas (Cobbold *et al.*, 1986; Zalán *et al.*, 1990; López-Gamundí *et al.*, 1994; Milani y Ramos, 1998).

Durante el Mesozoico, la evolución geológica de las cuencas fue caracterizada por una sedimentación continental asociada a un clima más cálido y desiertos, con importantes áreas de acumulación de sedimentos fluviales, eólicos y fluvio-lacustres (Mira *et al.*,

2015). Sin embargo no hay indicios claros sobre la presencia del Triásico equivalente a la Fm. Buena Vista en el subsuelo de la Mesopotamia, tal como se reconoce en la región central de Brasil. El Jurásico Superior - Cretácico, está representado por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, de color amarillento a rojo con niveles arcillosos y limolíticos. Estas areniscas se encuentran aflorando intercaladas con el basalto y fueron denominadas como Fm. Botucatú (Gonzaga de Campos, 1889) aunque se consideran terminos equivalentes: Fm. Tacuarembó (Padula y Mingramm, 1968), Arenisca de Misiones (Harrington, 1950), Fm. Misiones (Putzer, 1962), Fm. Solari; Miembro Solari (Herbst, 1971) y Fm. Curuzú Cuatía, Miembro Solari (Gentili y Rimoldi, 1979; Tchilinguirán *et al.*, 2005).

El magmatismo, consecuencia de la desintegración de Gondwana y la posterior apertura del Océano Atlántico está ampliamente representado en las cuencas Paraná y Chacoparanense. Los grandes depósitos de rocas ígneas son una de las características principales en ambas cuencas, asignadas al Grupo Serra Geral (Wildner *et al.*, 2007), compuestos por diferentes litologías: brecha basáltica, basalto vesicular y basalto porfídico (Mira *et al.*, 2015). Los basaltos dominantes de tipo toleítico, se disponen como filones capas y diques. En territorio argentino afloran junto al río Uruguay en el este de Misiones y Corrientes y noreste de Entre Ríos. El espesor varía para la región entre 800 y 1.000 metros, alcanzando los 1.930 metros en Brasil (Filiet *et al.*, 1998). La edad fue definida entre los 137Ma y 127Ma, con una mayor probabilidad en 130,5 Ma (Renne *et al.*, 1992, 1996; Ernesto *et al.*, 1999; Milaniet *et al.*, 2007; Janasiet *et al.*, 2011).

Los afloramientos de la Fm. Guichón (Lambert, 1939; Bossi 1966) también denominada Fm. Puerto Yerúa (De Alba y Serra 1959), Fm. Yerúa (Herbst, 1971), entre otros, se extienden en el margen derecho del río Uruguay. Está constituida por una sucesión silicoclástica de color rojizo a pardo, predominantemente arenosa, con cantidades subordinadas de conglomerados polimícticos. La presencia de restos fósiles le adjudica una edad Cretácico Superior. Esta unidad se presenta con afloramientos aislados y de escasas dimensiones.

La transición Cretácico/Terciario está representada a nivel regional (Formosa y zona norte de la provincia de Buenos Aires) con una sedimentación de ambientes marinos someros, litorales a lacustres marginales. Esto incluiría una sedimentación continua que va desde el Cretácico Superior hasta, por lo menos, el Eoceno (Yrigoyen, 1975). El registro Cenozoico consiste en arenas y “claymudstones” con cementación calcárea y sílice, del Oligoceno Inferior (Tófaló y Pazos, 2010). Su espesor no supera los 55m en la provincia de Entre Ríos, y disminuye hacia el norte, con afloramientos dispersos al suroeste de Corrientes. Durante el Mioceno, se produce una gran ingresión marina. Estos sedimentos asignados a la Formación Paraná (Bravard, 1858), son típicos de ambiente marino poco profundo y secuencias sedimentarias litorales, y están ampliamente representados en el lado oeste de la provincia de Corrientes según Orfeo (2005). Se define como una sucesión de arenas, limolitas y arcilitas a las que se le superponen calizas organógenas.

En el Mioceno-Plioceno, una regresión permitió la erosión de parte de esos sedimentos. Algunos de ellos cubiertos por sedimentos plio-pleistocenos de origen fluvial, definidos como la Formación Ituzaingó, con un espesor promedio de 300m disminuyendo hacia el sur (Torra, 2001). Son arenas cuarzosas de colores variables que en general se presentan sueltas, aunque puede observarse una cementación parcial de carácter tanto silíceo como ferruginoso. Son frecuentes las intercalaciones con bancos de arcillas y gravas. En algunos sectores yace en discordancia sobre los basaltos de Serra Geral (Orfeo *et al.*, 2011). Esta unidad se considera un equivalente temporal a la Fm. Salto definida por Goso (1965) dominada por la fracción gruesa, conglomerados y gravas, ambas representando un acontecimiento fluvial de un antiguo Río Uruguay (Herbst, 2000).

En discordancia sobre la Fm. Ituzaingó, en la provincia de Entre Ríos, se define la localidad tipo de la Fm. General Alvear (Iriondo, 1980). Está compuesta por limos y arcilitas pardas con alto contenido de cenizas volcánicas y carbonatos, dando origen a una tosca carbonática de naturaleza supergénica. Noriega *et al.* (2006) y Candela *et al.* (2007) adjudican una edad pliocena para esta formación.

El Pleistoceno Medio, representado por depósitos palustres y lacustres desarrollados en gran parte de la Mesopotamia, constituye la Fm. Hernandarias (Reig, 1956) en su localidad tipo de homónima, Entre Ríos. Compuesta por arcillas con intercalaciones de limos loésicos, con bancos de yeso. El Pleistoceno Superior, está representado por las formaciones Toropí (Herbst y Alvarez, 1974) y Yupoí (Herbst, 1969), ambas arenas arcillosas y limosas que, en algunos sectores, se intercalan con las areniscas de la Fm. Ituzaingó (Iriondo *et al.*, 1998). La Fm. Bompland, de igual litología, definida por Gentili y Rimoldi (1979), aflora en la cuenca del Río Miriñay, en la provincia de Corrientes. Tanto la formación Hernandarias, como Toropí, Yupoí y Bompland, representan facies fluviales y/o lacustres formadas en el mismo tiempo geológico.

Durante el Holoceno Superior, una capa de loess y limo eólico, definida como Fm. Tezanos Pintos, cubrió parte de la región (Iriondo, 1980). Esta unidad se apoya en discordancia sobre la Fm. Hernandarias, su espesor es variable entre 1 y 4 metros vinculado con el paleorelieve que cubrió. Depósitos de una transgresión holocénica se reconocen en el sur de la provincia de Entre Ríos, extendiéndose hacia el noreste, representados por una amplia llanura costera, definida como Fm. Isla Talavera (Gentili y Rimoldi, 1979). Son limos arcillosos, arenas y bancos de conchillas, con espesores que no superan los 20m.

Los valles fluviales formados por la erosión de la plataforma pleistocena dio lugar a una serie de paquetes sedimentarios que se expresan como niveles de terraza desarrollados desde el Lujanense a la actualidad (Aceñolaza y Sayago, 1980).

En la Figura 2.2 se resume el cuadro estratigráfico general de la Mesopotamia.

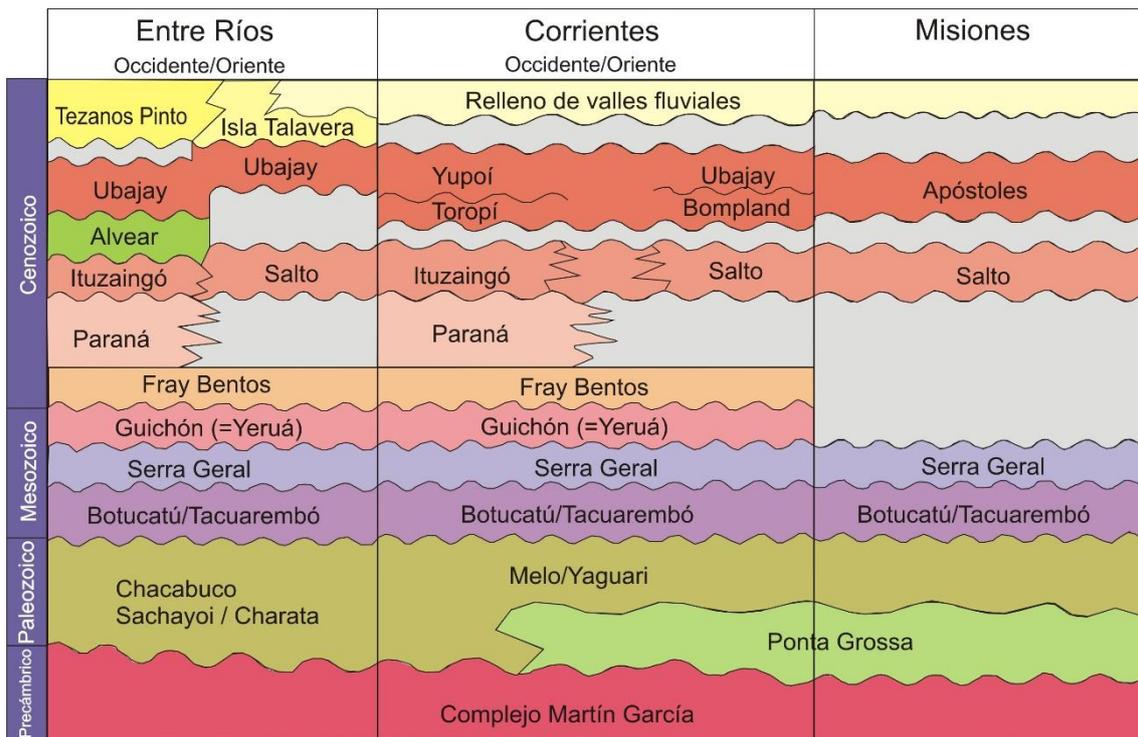


Figura 2.2. Cuadro estratigráfico general de la Mesopotamia. Tomado de Aceñolaza (2007).

2.3 Clasificación de los basaltos según el tipo de magma

El vulcanismo de la región, de naturaleza toleítica, forma parte de una gran provincia ígnea (GPI) que se extiende en toda la región mesopotámica argentina, gran parte de Brasil, Paraguay y Uruguay. Por ello ha sido denominada Provincia Magmática Paraná (PMP) (Bellieniet *al.*, 1984a) y posteriormente Gran Provincia Ígnea Paraná-Etendeka-Angola (Marzoliet *al.*, 1999) considerando su contraparte africana. Los derrames lávicos de la GPI de Paraná llegaron a cubrir el subsuelo de la cuenca Chacoparanense argentina (sudoeste de la cuenca de Paraná, Figura 2.3).

El conjunto de rocas sedimentarias y volcánicas que rellenan esta cuenca está integrado por varios ciclos sedimentarios que abarcan desde el Paleozoico hasta el reciente con un espesor total variable. La parte más profunda se encuentra en el sur, donde alcanza más de 4500 metros (Mira *et al.*, 2015). La característica más importante de la cuenca Charoparanense es la sucesión basáltica denominada Formación Serra Geral que está integrada por potentes derrames basálticos. El

vulcanismo tuvo lugar a fines del Jurásico y principalmente en el Cretácico Inferior, asociado a la apertura del océano Atlántico. Este acontecimiento eruptivo basáltico predominantemente toleítico y de magnitud regional, llegó a cubrir una superficie aproximada de 1.000.000Km² ocupando parte del territorio argentino y los países limítrofes de Brasil, Uruguay y Paraguay (White, 1908).

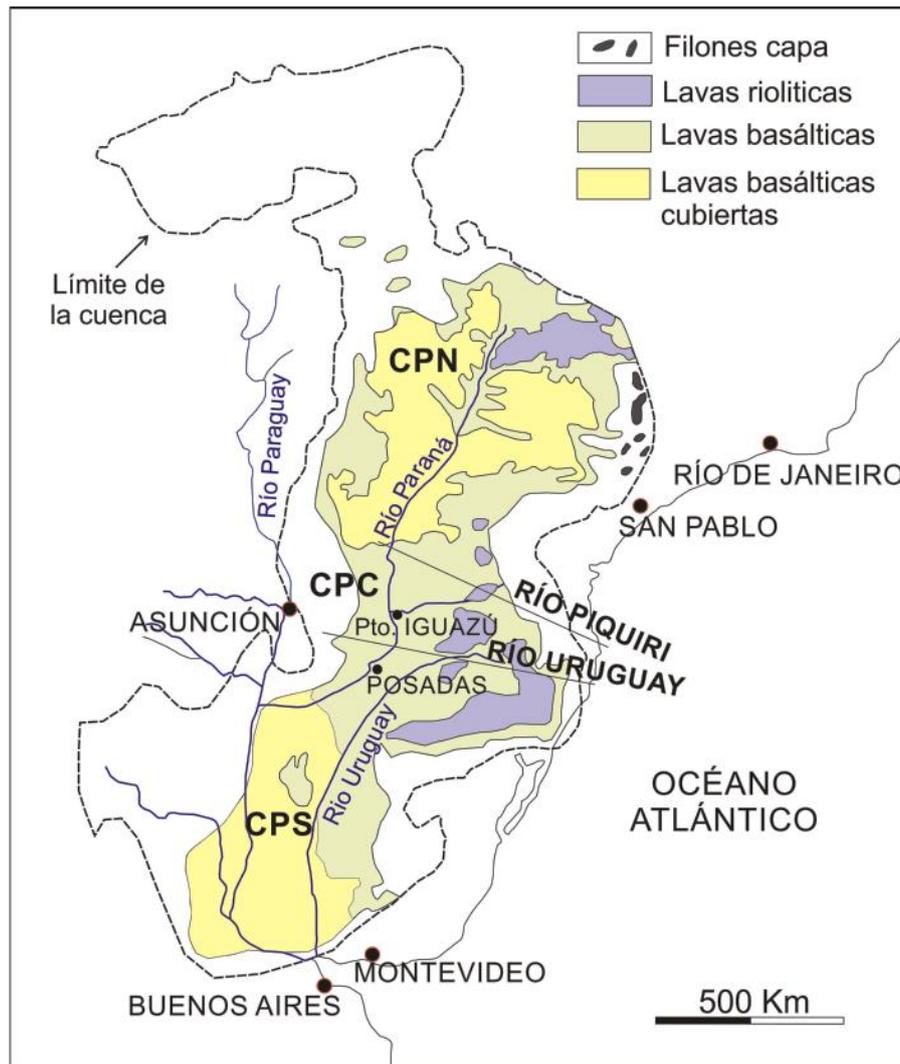


Figura 2.3. Reconstrucción de la extensión del magmatismo en América del Sur, tomado de Peate(1997). Se indican los sectores establecidos por Piccirillo *et al.* (1988a). CPS: Cuenca del Paraná Sur, CPC: Cuenca del Paraná Central y CPN: Cuenca del Paraná Norte.

El estudio regional de estos basaltos en Brasil, permitió demostrar la existencia de variaciones tanto en la distribución, como en la geoquímica de las vulcanitas (Piccirillo *et al.*, 1988b). El contenido de TiO₂ ha sido propuesto como discriminador de las rocas

de Paraná (Bellieni *et al.*, 1984b) luego generalizado para todas las grandes provincias de derrames basálticos continentales mesozoicos de Gondwana. Por tal motivo la cuenca Paraná fue dividida en 3 sectores: Paraná Norte (CPN), Paraná Central (CPC) y Paraná Sur (CPS) delimitadas por el lineamiento del río Piquirí y el lineamiento del río Uruguay, respectivamente (Piccirillo *et al.*, 1988a, 1988b) (Figura 2.3). Estos autores definieron, a partir del análisis de nueve perforaciones en la región central de la cuenca Paraná (Brasil), seis tipos de magmas que denominaron: Urubici, Pitanga, Paranapanema, Ribeira, Esmeralda y Gramado (clasificación propuesta por Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997). En base a estos criterios los tres primeros litotipos son considerados de alto titanio ($\text{TiO}_2 > 2\%$) y los restantes de bajo titanio ($\text{TiO}_2 < 2\%$), pero es importante señalar que las variedades de bajo Ti pueden presentar valores tan altos como 2,3% de TiO_2 mientras que las de alto Ti pueden incluir rocas con valores bajos como 1,7% de TiO_2 . Debido a este solapamiento es que se definieron los términos transicionales o intermedios con valores de entre 2-3% TiO_2 , distinguido por Piccirillo *et al.* (1988c) en la parte central de la cuenca Paraná y denominado por Peate *et al.* (1988) como magma tipo Paranapanema.

Bellieni *et al.* (1984a) y Mantovani *et al.* (1985) sectorizaron geográficamente a los basaltos de acuerdo a su contenido de TiO_2 siendo los de “bajo Ti” predominantes en el sector sur de la provincia ígnea (norte de Argentina (provincia de Misiones), sur de Paraguay, Uruguay y Brasil) y de “alto Ti” dominantes en la región norte, limitada aproximadamente a los 27°S. Otros autores asignaron gran importancia a la relación Ti/Y, como así también a los cocientes Ti/Zr, Zr/Y y al contenido de Sr (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997).

El reconocimiento de los distintos litotipos en el subsuelo de la cuenca de Paraná permitió especular con una posible estratigrafía volcánica para toda la PMP (Peate *et al.*, 1992; Stewart *et al.*, 1996; Peate, 1997). Según la interpretación de Peate *et al.* (1992) el magmatismo habría migrado hacia el norte de la cuenca y habría tenido dos centros magmáticos principales que conformaron dos “provincias” sucesivas: una más antigua en el sur, que comprende a los magmas Gramado, Esmeralda; y otra más

joven, desarrollada aproximadamente a 750km al norte, formada por los magmas Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira. Según este modelo los derrames expuestos en el sur de Brasil y en Uruguay corresponderían a las secuencias más antiguas de la provincia.

En el sur de Brasil, los flujos de Gramado se limitan principalmente a la escarpa costera de la Serra Geral, mientras que los flujos de Esmeralda a menudo tapan localmente la pila de lava y son más comunes en la meseta central. El patrón general de distribución superficial de estos dos tipos de magma es consistente con la relación estratigráfica que se deduce de perforaciones y de las secciones de Serra Geral, con los magmas de Esmeralda formando una unidad más joven por encima de los de Gramado (Peate *et al.*, 1992) (Figura 2.4). La distribución composicional reconocida por estos autores los llevó a suponer que las lavas más australes, en Argentina y Uruguay, corresponderían únicamente al tipo Gramado (Peate, 1997).

Las lavas Paranapanema cubren una amplia área de la región norte de Paraná, centrada en el río Paraná, mientras que las lavas Pitanga se concentran al noreste y en los márgenes orientales. Este patrón de afloramiento es consistente con los resultados obtenidos a partir de perforaciones, donde las muestras de Paranapanema se encuentran sobre las de Pitanga. Las muestras de Ribeira tienen una distribución superficial similar (Petrini *et al.*, 1987) a las de Paranapanema al norte. Sin embargo, las muestras de Ribeira se encontraron sólo en una perforación central del Paraná, donde estaban por debajo de los flujos de Pitanga y Paranapanema (Peate *et al.*, 1992).

Observaciones realizadas por otros autores en la PMP revelaron que en la zona sur predominan los basaltos de bajo titanio, en la central son frecuentes los litotipos intermedios (2-3% TiO₂), coexistiendo los de bajo y alto titanio, mientras que estos últimos dominan en la región norte (Piccirillo y Melfi 1988).

Nuevas evidencias e interpretaciones llevaron a Peate (1997) a considerar que los magmas tipo, definidos a priori como unidades cronoestratigráficas, podrían haber sido emplazados de manera diacrónica durante la evolución de la provincia. Peate (1997) encontró consistente esta propuesta con los datos ^{40}Ar - ^{39}Ar aportados por Turner *et al.* (1994) y Stewart *et al.* (1996). Estudios geocronológicos (^{40}Ar - ^{39}Ar) realizados por Mincato (2000) concluyeron al respecto que el volcanismo habría migrado de este a oeste y de sur a norte, en coincidencia con el modelo de Peate *et al.* (1992) y en desacuerdo con otros autores que postularon un sentido de migración, NW - SE (Turner *et al.*, 1994, 1996; Mantovani *et al.*, 1994 y Stewart *et al.*, 1996, citados en Mincato 2000).

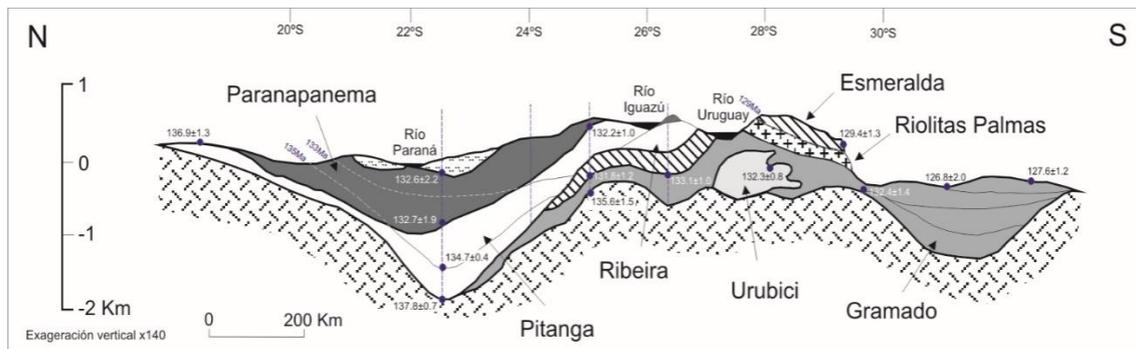


Figura 2.4: Sección esquemática N-S mostrando la estratigrafía interna de las lavas de Paraná (Peate *et al.*, 1992). Las líneas de tiempo de 135 Ma, 133 Ma y 129 Ma (construidas por Stewart *et al.*, 1996) cortan las unidades estratigráficas definidas por tipos de composición de magmas, según Peate *et al.* (1992).

CAPÍTULO 3

LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

3.1 Reacción álcali-agregado

3.1.1 Primeros trabajos relacionados con la reacción álcali agregado en el mundo

Históricamente, el diseño de las estructuras de hormigón se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica, sin embargo, son variados los procesos de deterioro que interfieren en la durabilidad, pudiendo ser clasificados como químicos y físicos. Entre los primeros los más frecuentes son, carbonatación, penetración por iones cloruro, ataque por sulfatos y reacción álcali-agregado (RAA).

La RAA se desarrolla entre algunos materiales que constituyen los agregados y los hidróxidos alcalinos provenientes principalmente del cemento, pudiendo comprometer el desempeño de las estructuras. Fue descubierta en la década del 30' del siglo XX en Estados Unidos (Stanton, 1940a) y no fue hasta la década de los 70' que su investigación cobró auge, cuando comenzaron a surgir relatos de dicha patología en diversos países.

El primer registro de la reacción álcali-agregado tiene su origen en California, entre los años 1920 y 1930, cuando diferentes estructuras tales como edificios, puentes y pavimentos, registraron agrietamientos y expansiones, a pocos años de su construcción. Fue Thomas E. Stanton, ingeniero americano, quien observó un cilindro de hormigón, guardado durante un año en un contenedor, con presencia de manchas blancas que determinó como carbonato de sodio y al poco tiempo, la muestra se fisuró, dando el puntapié inicial para su estudio e investigación. Hasta mediados de los años cincuenta estaba admitida la hipótesis de que los agregados se comportaban químicamente como inertes cuando eran utilizados en el hormigón (Chaiken y Halstead, 1960) y fue en 1940 cuando se demostró que el deterioro del cilindro de

hormigón fue debido al álcali de cemento portland y a las rocas del agregado, razón por la cual se la denominó “reacción álcali-agregado”.

Stanton y colaboradores, comprobaron que, en presencia de humedad permanente, se desarrollaba una reacción entre los álcalis del cemento y algunos agregados pétreos, a consecuencia de lo cual se producía aumento de volumen que fisuraba el hormigón. También comprobaron que la reacción se daba de forma más intensa cuando intervenían agregados de origen natural con fuerte meteorización, en los que se presentaba una forma de sílice hidratada, similar al ópalo. Este descubrimiento tuvo gran aceptación y fue entre los años 1940 y 1942 cuando Stanton (1940a y b) y Stanton *et al.* (1942) publicaron los primeros trabajos acerca de la temática, despertando el interés de los demás investigadores. Como consecuencia de esto, muchos procesos de deterioro en el hormigón descritos con anterioridad, pero sin explicación, fueron asociados a este fenómeno (Walker *et al.*, 2006).

El descubrimiento de esta reacción y la magnitud del deterioro, que se suponía podría ocasionar, alertó mucho, atribuyendo a este proceso cualquier tipo de fisura. Fue entonces que en 1941 se estableció un límite inferior a 0,6% en peso en el contenido de álcali del cemento para grandes trabajos ingenieriles, y así disminuir los riesgos (CSA-A23.2-14A, 2014).

Durante la década del '50, la reacción álcali-agregado fue estudiada por muchos investigadores a nivel mundial, iniciándose en Estados Unidos, más tarde en Europa, Canadá y otras partes del mundo, motivo por el cual los estudios avanzaron rápidamente y se lograron identificar los componentes que intervenían en la reacción. Como consecuencia de este fenómeno, se produce una disminución en la resistencia del hormigón, expansión considerable y desarrollo de un patrón de fisuramiento característico (McCoy y Caldwell, 1951) que luego se asoció a lo que se conoce hoy como “fisuramiento en forma de mapa”.

Una gran contribución a las investigaciones fue realizada por Swenson (1957a; 1957b), quien reconoció la reacción con agregados carbonáticos, definida como reacción álcali-carbonato (RAC). Desde entonces la RAA se dividió en RAC y reacción álcali – sílice (RAS), siendo Idorn (1956), unos de los primeros científicos europeos en investigar esta última.

Pocos temas de un contenido tan específico como el comportamiento químico del material, han tenido tanta difusión e interés en tan poco tiempo, como el de la reacción expansiva álcali-agregado. Obras con RAA se han observado en muchos países por lo que esta reacción constituye una de las más renombradas causas de deterioro del hormigón en servicio. Por tal motivo, es que nace la necesidad de estudiar sistemáticamente esta patología para evitar el deterioro prematuro de estructuras de hormigón, ya que una vez que inicia la reacción, es muy difícil detenerla.

3.1.2 Primeros trabajos relacionados con la RAA en Argentina

Según Fava *et al.* (1961), el primer antecedente de la RAS en Argentina es la publicación de Astarloa (1949) y cita como primer mención un caso de estudio en la Ruta Nacional N°188, tramo Pergamino-San Nicolás.

Durante los años 1949 y 1950, la Dirección de Vialidad de la provincia de Buenos Aires construyó la ruta que une La Plata, con la ciudad balnearia de Punta Lara. Al año de finalizada, se registraron fenómenos, tales como el cierre de las juntas de dilatación, dislocación y rotura del hormigón en la zona de juntas, el encimado de losas contiguas y fisuras tipo “mapa”. El LEMIT fue el encargado de estudiar, en el año 1958, las causas del fenómeno, y concluyeron que era consecuencia del desarrollo de la reacción álcali-agregado (Falcone y Batic, 2012).

En el año 1965 se creó la Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado, para evaluar la potencial reactividad de agregados provenientes de diferentes yacimientos (Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado, 1966; 1967; 1968; 1972a; 1972b;

1972c). Giovambattista *et al.* (1981) resumieron los resultados obtenidos por dicha Comisión durante los años mencionados y determinaron que si bien existen agregados potencialmente reactivos en Argentina, hay pocas evidencias del desarrollo de la reacción en estructuras en servicio.

En la Figura 3.1 se resumen los resultados obtenidos en el año 1972, por la Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado, a partir de ensayos de expansión en barras de morteros y del examen petrográfico (Veronelli, 1975).

Esta delimitación de áreas con agregados potencialmente reactivos, ha sufrido modificaciones a través del tiempo (Batic *et al.*, 2008), debido a los avances del conocimiento con respecto a la RAA y la evolución de los métodos de ensayo.

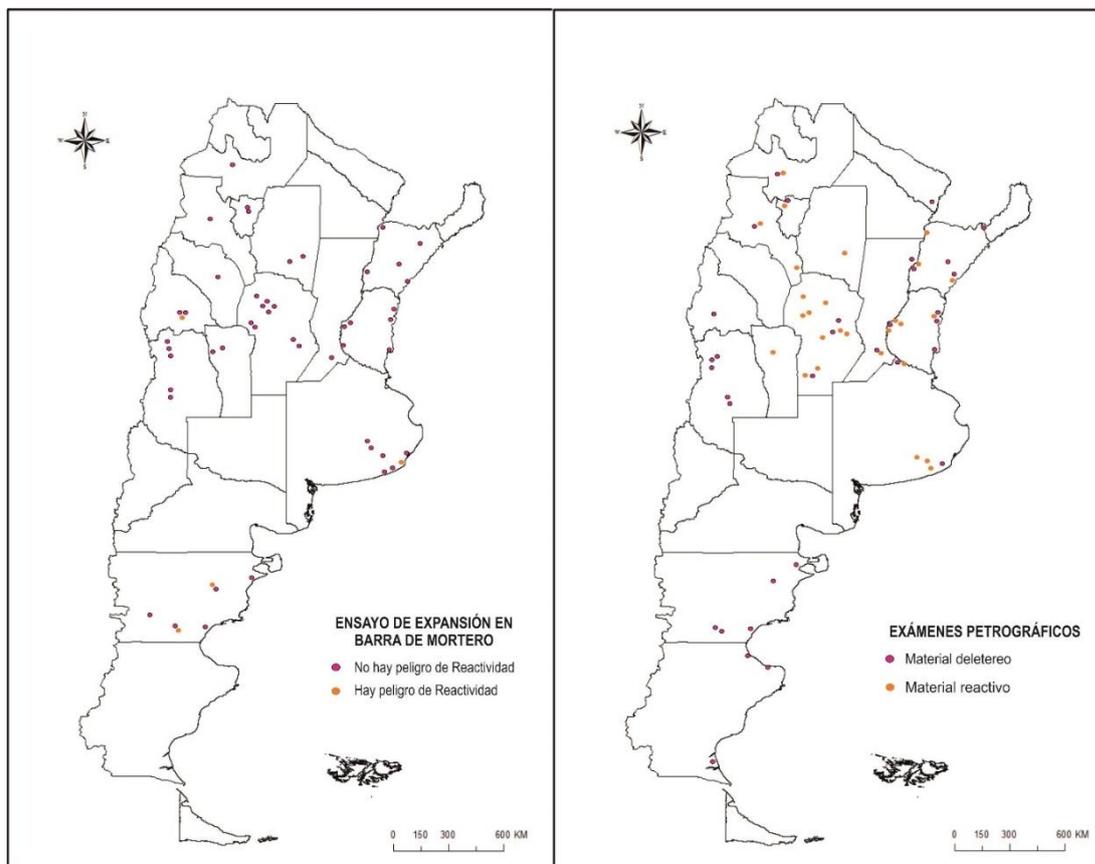


Figura 3.1. Resumen de yacimientos donde se muestran los resultados obtenidos en 1972, por la Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado, en ensayos de expansión de morteros y examen petrográfico (Tomado de Veronelli, 1975).

En la década del '60, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), comenzó a trabajar para normalizar los ensayos para evaluar la RAS. En 1966 se publicó el método de la barra de mortero (IRAM 1637, 1992) basada en la norma ASTM C227 (2010). En 1968, se publicó la norma IRAM 1650 (1968) (método de ensayo químico), basada en la ASTM C289 (2007), actualmente en desuso y dada de baja por ASTM en 2016, y la norma IRAM 1649 (examen petrográfico de agregados para hormigón) modificada en el 2008 y basada en la ASTM C295 (2012). En 1997, se publicó la norma IRAM 1674 (método acelerado de la barra de mortero) basada en la ASTM C1260 (2014) y la norma IRAM 1700 (método del prisma de hormigón) modificada en el año 2012 y basada en la ASTM C1293 (2008).

En el año 1978 se crea el CIRSOC (Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles), redactando el CIRSOC 201 (en vigencia desde 1982) para las estructuras de hormigón, modificado en el año 2005.

3.2 Reacción álcali-agregado

La RAA corresponde básicamente a un proceso físico-químico que se debe a la interacción entre los álcalis del cemento portland (Na_2O y K_2O) y cierto tipo de compuestos reactivos presentes en algunos agregados, lo que bajo ciertas condiciones da lugar a la formación de un gel hidrófilo, que satura los poros y genera aumento de volumen, ocasionando fisuración y pérdida de la durabilidad y resistencia en la estructura (Dent Glasser y Kataoka, 1981; Fournier y Bérubé, 2000; Menéndez y Soriano, 2007; Page y Page, 2007).

Según sea la naturaleza del agregado existen dos tipos de reacciones:

- La reacción álcali-carbonato (RAC): Se define como la reacción química que se da entre ciertos agregados de naturaleza carbonática (calizas y dolomías), al contacto con los álcalis del cemento presentes en la solución de poro del

mortero u hormigón. Bajo determinadas condiciones, esta reacción puede producir expansión.

- La reacción álcali-sílice (RAS): Se define como la reacción entre los elementos alcalinos del cemento en solución y ciertos minerales de naturaleza silíceos que constituyen el agregado (ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, cuarzo microcristalino y fuertemente tensionado).

Si bien las manifestaciones externas en las estructuras afectadas por la RAC son muy similares a las de la RAS, los mecanismos de expansión que se dan en cada caso son diferentes. Anteriormente también se creía que el mecanismo de la reacción era distinto para las rocas con minerales silíceos cristalinos, que para las rocas con estructuras más desordenadas, distinguiéndose entre reacción álcali-silicato (RASi) y reacción álcali-sílice (RAS) respectivamente. Sin embargo, se ha demostrado que la reacción es la misma, sólo que en función de la cristalinidad de la sílice, la cinética de la reacción varía, dándose más rápidamente en las variedades criptocristalinas y amorfas (Batic y Sota, 2001; Wigum *et al.*, 2006).

- Agregados de reacción rápida: La reacción se produce a partir del primer año, o menos, en hormigones con agregados que contengan sílice pobremente cristalizada o metaestable como ópalo, tridimita, cristobalita o vidrio volcánico.
- Agregados de reacción lenta: El deterioro se manifiesta en un periodo mayor a los 8 años de construida la estructura y se origina cuando el agregado contiene formas de cuarzo microcristalino, fuertemente tensionado o deformado.

La más común de las reacciones, y la cual se va a abordar de ahora en más en esta investigación es la reacción álcali-sílice, esto se debe a que existen más agregados con minerales reactivos con sílice tanto en Argentina, como en la mayoría de los sectores productores de áridos en el mundo (Kosmatka *et al.*, 2004).

3.2.1 Condiciones para que se desarrolle la RAS

Para que la RAS tenga lugar deben darse tres condiciones necesarias (Touma, 2000):

- Presencia de álcalis
- Humedad elevada
- Agregados potencialmente reactivos

Sin embargo existen otros autores que incluyen el efecto del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como un cuarto parámetro principal (Wigum *et al.*, 2006). Otros factores que tienen influencia sobre los procesos expansivos son la temperatura, lo cual queda evidenciado en los ensayos normalizados, y el elevado pH (> 12) que se relaciona con la estabilidad de la sílice.

3.2.1.1 Presencia de álcalis

El Na^+ y el K^+ en conjunto con los iones hidroxilos, son los que se encuentran en mayor proporción en la solución de poro del hormigón (Kurtis *et al.*, 2002) y se denominan comúnmente álcalis (Na_2O y K_2O). Su contenido en el cemento se expresa como óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), ponderando los óxidos de sodio y potasio en términos de sus pesos moleculares (Ec 3.1).

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}\% = \text{Na}_2\text{O}\% + 0,658 \text{K}_2\text{O}\% \text{ (Ec 3.1)}$$

Antecedentes de obra y de laboratorio, demuestran que aquellos cementos que contienen valores $>0,6\%$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ producen expansiones significativas en combinación con agregados reactivos (CSA-A23.2-14A, 2014). De ahí surge, que si se tiene un elevado contenido de iones alcalinos en la solución de poro, más elevado será el pH y mayor la posibilidad de desarrollo de la RAS (Alaejos y Bermúdez, 2003).

A partir de este valor distintas normativas diferencian los cementos de bajo y alto álcali y permiten el uso de agregados potencialmente reactivos limitando el álcali del cemento a contenidos por debajo del 0,6%. Sin embargo para dosificaciones con un

contenido de cemento muy alto, valores de álcali menores al límite planteado pueden resultar dañinos (Figura 3.2).

Por otra parte es frecuente referir el contenido de álcali en kg/m^3 de hormigón. En Canadá y algunos países de Europa se considera que contenidos menores a 3kg/m^3 , no producirán expansiones deletéreas (Lindgård *et al.*, 2012). Cabe destacar que los álcalis pueden provenir también de fuentes externas, y tendrá relación con la porosidad, permeabilidad y el periodo de exposición. Estos álcalis pueden incorporarse por medio del agua de mar, sales descongelantes, aguas subterráneas, etc.

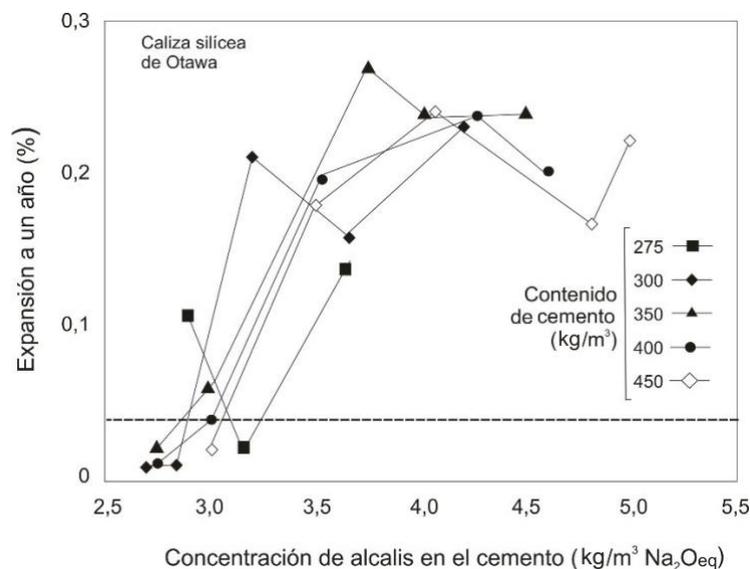


Figura 3.2. Expansión de prismas de hormigón en función del contenido de álcalis (Lindgård *et al.*, 2012).

Vivian (1950), demostró que para cada agregado reactivo tiene que estar presente una determinada cantidad de álcali para que se produzca la máxima expansión, y que las expansiones se atenúan progresivamente para mayores o menores cantidades de álcalis en el cemento. Según los resultados propuestos por el autor, en la Figura 3.3 se observa que los cementos A y C, a pesar de liberar distintas cantidades de álcali, producen igual expansión. Mientras que el cemento B con menos álcali que el C, pero más que el A, produce mayores expansiones.

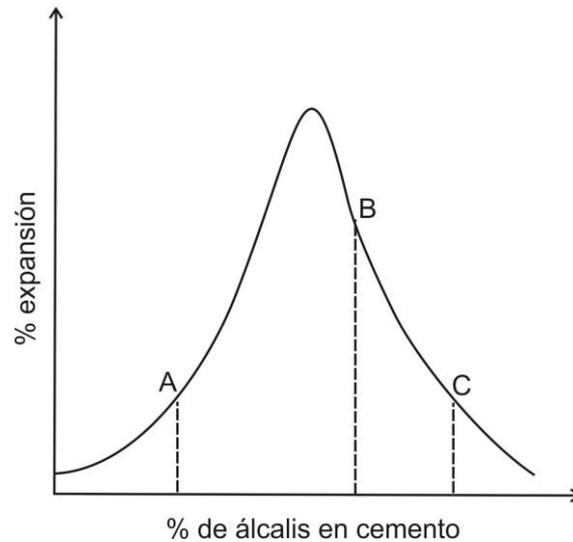


Figura 3.3. Curva de expansión para un determinado contenido de agregado reactivo y variable álcali en el cemento (Vivian 1950).

3.2.1.2 Humedad elevada

Para que se produzca la reacción se necesita un cierto contenido de agua, ya que ésta actúa como medio de transporte para los iones en solución y además es un elemento esencial para la producción del gel (Poole, 1992; Poyet *et al.*, 2007; Zollinger *et al.*, 2009; Lindgård *et al.*, 2012). Se considera que en el interior del hormigón se mantiene entre un 80-90% y se define como humedad relativa (HR).

La disponibilidad de la humedad proveniente de fuentes externas (lluvia, agua de mar, nieve, humedad del suelo subyacente, drenajes, etc.), aunque estos eventos sean intermitentes, pueden resultar en una reserva que se acumula en la estructura y contribuye a la RAS. Estudios realizados por Olafsson (1986); Stark (1991); Kurihara y Katawaki (1989); Larive *et al.* (2000), entre otros, han demostrado que el límite crítico para el desarrollo de la reacción es 80%. En la Figura 3.4 se muestra que agregados expuestos a valores superiores a dicho porcentaje de humedad relativa, aumentan su reactividad de manera exponencial.

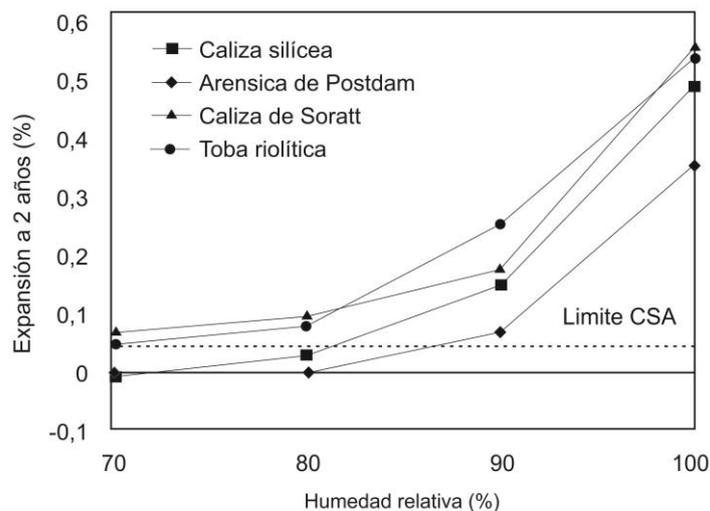


Figura 3.4. Efectos de la humedad relativa de diferentes agregados usando la norma ASTM C1293 (Pendneault, 1996).

Un aporte de agua posterior a la deshidratación parcial de los productos de la RAS, pueden volver a hidratarlo y causar nuevas expansiones, e incluso formar nuevos geles (Larive *et al.*, 2000; Multon *et al.*, 2010; Poole, 1992). Por el contrario, si el gel se seca por completo, se carbonata y es incapaz de expandirse nuevamente por más que incorpore agua (Poole, 1992). En obras construidas con áridos potencialmente reactivos debe considerarse si la misma va a estar emplazada en ambientes con elevada humedad, la proximidad al nivel freático, el escurrimiento, etc., ya que tales factores que contribuyen al desarrollo de la RAS (Priano *et al.*, 2012).

3.2.1.3 Agregados potencialmente reactivos

Los agregados constituyen entre un 60 y 80% de su volumen en el hormigón, por lo cual tienen mucha influencia sobre el mismo. Los agregados considerados potencialmente reactivos para el desarrollo de la RAS son aquellos que contienen variedades de sílice que se comporten de manera inestable bajo condiciones de elevada alcalinidad como las que se desarrollan en el hormigón ($\text{pH} > 12$). Su velocidad va a estar dada por el origen, la composición y la textura de la roca utilizada.

La RAS se desarrollará más rápidamente cuanto más desordenada sea la estructura del mineral o se trate de sustancias amorfas. Las estructuras cristalinas regulares han demostrado ser química y mecánicamente estables, impermeables y solo reaccionan en la superficie. Por el contrario, las estructuras irregulares (amorfas) son más porosas, tienen un área superficial grande y, como consecuencia, son muy reactivas. Esto se debe a que los enlaces cristalinos evolucionan hacia un nuevo equilibrio, bajo las condiciones de alcalinidad que rigen en el hormigón, y es lo que se conoce como *reactividad* (Leming, 1996).

Por otra parte a medida que aumenta el porcentaje de agregado potencialmente reactivo, aumenta la expansión en el hormigón, hasta alcanzar un valor a partir del cual, al seguir incrementando la proporción de agregado, la expansión disminuye. Esto se debe a que la cantidad de material reactivo es mayor que el álcali necesario para que todo ese material reaccione, entonces habrá pocos álcalis para una gran cantidad de material reactivo y la expansión será nuevamente baja (Figura 3.5) debido al “efecto pessimum”, y va a depender del grado de reactividad que presente el material utilizado y del contenido de álcali del cemento (West, 1996).

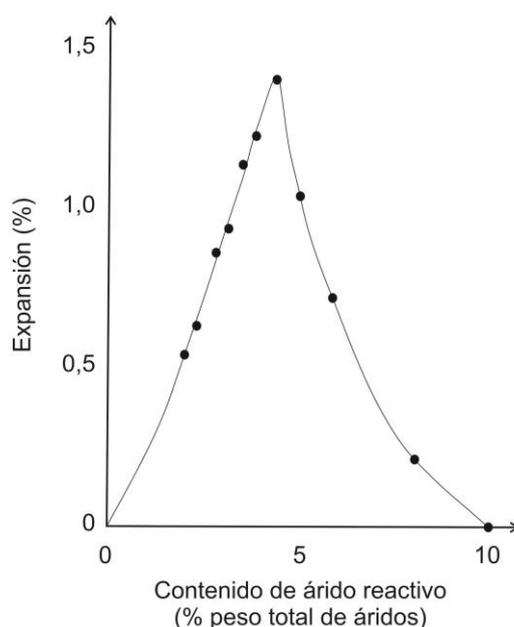


Figura 3.5. Influencia del contenido de áridos reactivos frente a la expansión (Tomado de West, 1996).

Otros factores que influyen sobre el fenómeno de la RAS están vinculados con el tamaño de las partículas, el contenido de aire incorporado, la porosidad de la pasta y la relación agua-cemento (a/c).

Hobbs y Gutteridge (1979) demostraron que la velocidad de reacción es superior y se producen expansiones más elevadas en relación a la disminución del tamaño de las partículas. Esto podría deberse a que las partículas más pequeñas proporcionan una mayor superficie específica para que la reacción tenga lugar. Sin embargo, la afirmación anterior es cierta, por encima de un cierto tamaño de grano. Cuando las partículas reactivas, son más pequeñas de un límite de tamaño dado, la expansión disminuye debido a un efecto puzolánico. El límite de tamaño de partículas es de $75\mu\text{m}$, con tamaños inferiores, el desarrollo de la reacción es muy disperso, lo cual promueve mínimas expansiones reduciendo la concentración de tensiones que generen fisuras (Wigum *et al.*, 2006).

Otro factor importante a considerar es el relacionado con la variación de la relación agua-cemento (a/c). Wigum (1995) investigó el efecto de diferentes relaciones a/c (0,45 y 0,50) en barras de mortero elaboradas con agregados inocuos (Figura 3.6) evidenciando que un aumento de la relación a/c, incrementa la expansión a través del tiempo.

3.2.1.4 Temperatura

Este parámetro se relaciona con la velocidad de la reacción. Es de esperar que una reacción química se acelere con el aumento de la temperatura. Sin embargo, a bajas temperaturas la reacción que se produce es lo suficientemente lenta como para no ocasionar ningún deterioro durante la vida útil del hormigón. De igual manera hay que tener en cuenta que el gel a altas temperaturas se torna menos viscoso y se introduce mejor por las fisuras y huecos del hormigón, pudiendo disipar en parte la expansión. A medida que pasa el tiempo la tasa de expansión disminuye y, hormigones sometidos a menor temperatura inician su expansión más tarde y más lentamente. Estos

alcanzarán el mismo nivel de expansión e incluso lo podrán superar respecto a los afectados por una temperatura más elevada (Swamy, 1992).

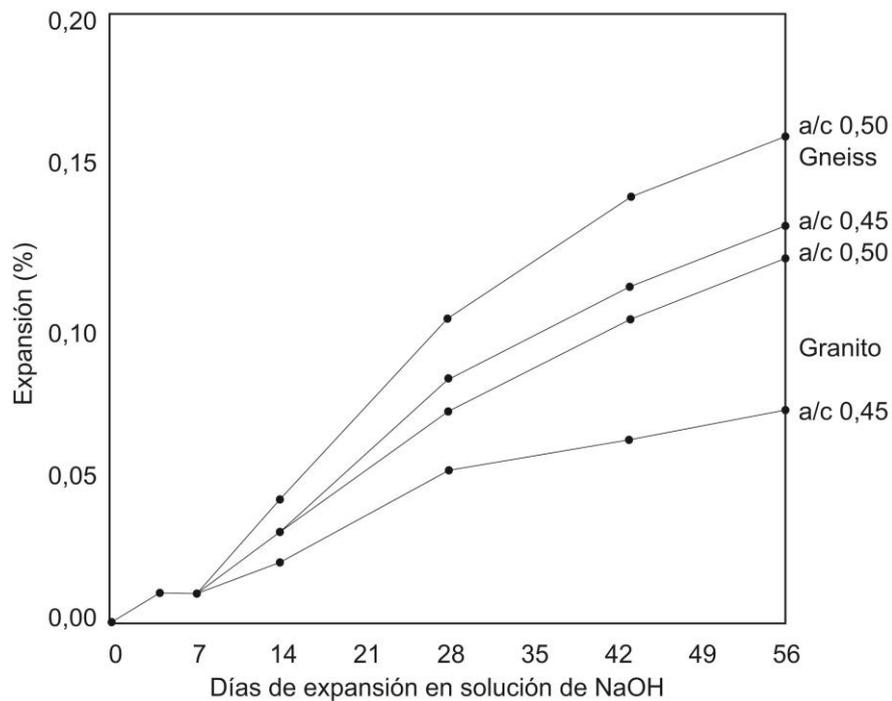


Figura 3.6. Efecto de diferentes relaciones agua-cemento para ensayos de barras de mortero acelerado, para rocas inocuas (gneiss y granito) Wigum (1995).

En la Figura 3.7 se puede observar que el comportamiento de las curvas de expansión y de reacción en probetas ensayadas a 20°C y 40°C en función de los álcalis y del tiempo es similar. Si bien el porcentaje inicial de álcalis es mayor a mayor temperatura, la relación final de álcalis consumidos es menor en las probetas ensayadas a 40°C (Diamond *et al.*, 1981).

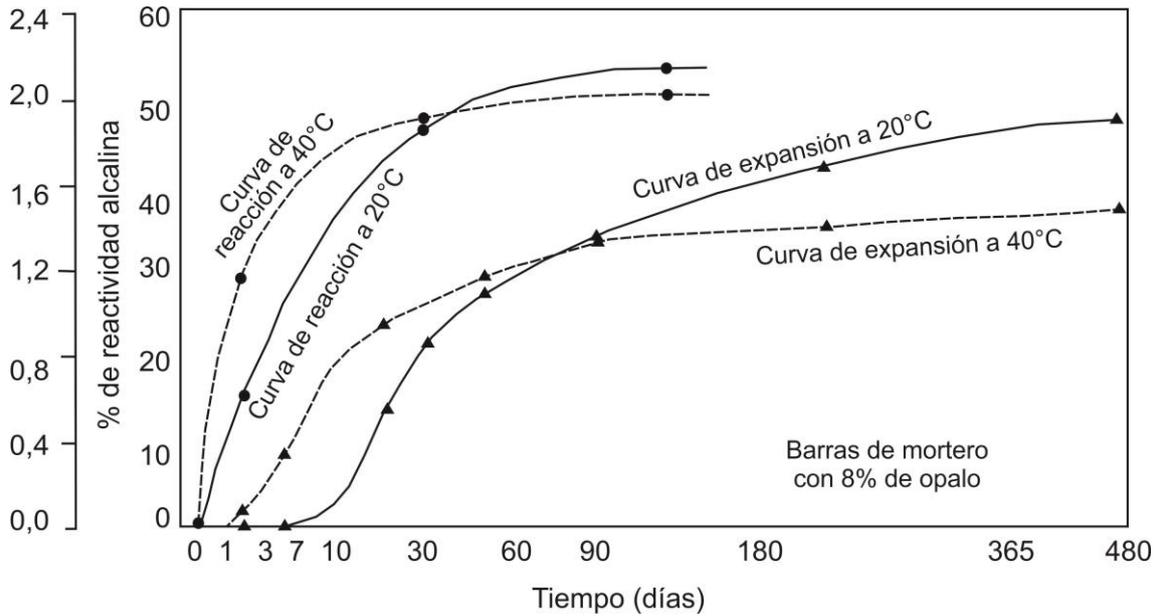


Figura 3.7. Comparación de parámetros de reacción y curvas de expansión para probetas de mortero a 20°C y 40°C. Tomado de Diamond *et al.* (1981).

3.2.1.5 Influencia del calcio

El papel del calcio en la reacción es aún un tema de discusión. Jiménez (2014) afirma que el calcio no participa directamente en la reacción, pero su presencia es determinante para que el producto sea o no expansivo. El calcio se presenta en forma de $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ (hidróxido de calcio) como producto de la reacción de la hidratación del cemento:

- Silicato Tricálcico + Agua = Gel CSH + Hidróxido de Calcio.
- Silicato Bicálcico + Agua = Gel CSH + Hidróxido de Calcio

Este hidróxido de calcio se encuentra disponible en la solución de poro, para participar en las reacciones con los hidróxidos alcalinos y la sílice reactiva, dando lugar a la formación de un gel de silicatos alcalino-cálcicos (gel CSH) que llenará los poros y rodeará las partículas de agregado (Veronelli, 1978). Según Powers y Steinour (1955a, 1955b) la concentración de $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ controla el tipo de producto que se va a desarrollar. Bajas concentraciones de $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ producen un gel sílico-alcálico de carácter no expansivo, pero cuando se encuentra en cantidad suficiente da lugar a un producto expansivo.

El Ca también provee alcalinidad a la solución de poro acuosa, lo cual favorece la solubilidad de la sílice y afecta la velocidad de difusión de la misma. Altos contenidos de Ca previenen la migración de la sílice lo cual conduce a la expansión. La presencia de calcio también modifica las propiedades en el gel, como la viscosidad, siendo que menores contenidos de calcio forman un gel más fluido, permitiendo que éste pueda circular por los poros sin generar elevada presión, evitando la fisuración y los daños (Jiménez, 2014).

3.2.2 Mecanismo de la reacción

El mecanismo principal de las reacciones químicas que tienen lugar en el hormigón se puede resumir en los siguientes puntos (Ichikawa y Miura, 2007):

- 1- En primera instancia el hidróxido alcalino en la solución de poro, ataca al agregado reactivo. Esta reacción se produce desde afuera hacia el interior del árido, y las concentraciones de los iones alcalinos y el agua de hidratación disminuyen a medida que se incrementa la distancia desde la superficie del árido. Alrededor del agregado se forma un silicato alcalino maduro, que en parte es extruido y disuelto en la solución de poro, mientras que en la capa más externa del mismo se desarrolla un silicato alcalino inmaduro.
- 2- El consumo de iones hidroxilos por parte de la reacción aumenta significativamente el contenido de iones Ca^{2+} los cuales reaccionarán con el silicato alcalino maduro, para dar lugar a la formación de un silicato calco-alcalino. Este silicato rellena los poros reduciendo la permeabilidad del hormigón y aumentando su resistencia.
- 3- Por otra parte el silicato alcalino inmaduro reacciona con los iones de Ca^{2+} dando lugar a la formación progresiva de un halo de reacción de un silicato calco alcalino. Los hidróxidos alcalinos desplazados por los iones de Ca^{2+} continúan atacando el

agregado, actuando como catalizadores en el ataque, por tal motivo cantidades mínimas de iones alcalinos son relevantes en la reacción álcali-sílice.

- 4- El halo de reacción generado permite que los hidróxidos alcalinos penetren en el árido, pero impide la salida del silicato alcalino resultante. Esto lleva a la acumulación del mismo en el interior de la partícula, donde la presión aumenta hasta fisurar tanto el halo de reacción como el hormigón que lo rodea. La presión de fisuración, va a ser proporcional a la cantidad de silicato alcalino que se genere en el árido.

3.2.3 Efectos de la RAS

Las estructuras afectadas por la RAS muestran signos típicos como: fisuración en mapa, exudación de geles, “pop-outs”, coronas de reacción y evidencias de aumento de volumen (Poole, 1992).

El primer indicio o manifestación externa es la aparición de fisuras y grietas sobre la superficie del hormigón (Thomas, 2011), comúnmente llamadas fisuración en mapa. Presentan un patrón de distribución característico, con desarrollo de fisuras a partir de un punto triple con un diseño pseudo-hexagonal, distribuidas a 120° aproximadamente (Figura 3.8a). Se orientan al azar sobre las superficies de los elementos de hormigón libre (sin restricciones) en todas las direcciones. En algunos casos, la expansión se restringe en una o más direcciones debido al confinamiento interno del refuerzo o el pretensado convencional, o por fuerzas externas de los pilares o estructuras adyacentes. En tales casos, se produce una mayor expansión en la dirección de menor confinamiento y las grietas se orientan en la misma dirección que las tensiones de confinamiento, como por ejemplo, en pavimentos de hormigón (Figura 3.8b). Estas fisuras dan por resultado una disminución de la resistencia del hormigón y un aumento de su permeabilidad.

A través de estas fisuras el gel expansivo, formado como consecuencia de la reacción del agregado reactivo en presencia de humedad, se acomoda en los espacios libres creados e incluso en algunos casos puede llegar a la superficie (Figura 3.8a). Cuando el gel está húmedo su apariencia es de color transparente o pardo y con textura resinosa, pero al perder el agua se carbonata y adquiere un color blaquescino, en ocasiones con fisuras de retracción (St. John *et al.*, 1998; Sarkar *et al.*, 2004).

Los agregados reactivos que expanden cerca de la superficie, pueden inducir el desprendimiento de una porción del mortero que los recubre, dejando el agregado expuesto. Esta característica se denomina “pop-outs” (Lindgård *et al.*, 2012) (Figura 3.8c). Cabe destacar que este tipo de manifestaciones no es exclusivo de la RAS, ya que puede provenir de otros procesos expansivos, como la alternancia de congelamiento y deshielo, o bien del desprendimiento de partículas arcillosas en la superficie del hormigón. Además la durabilidad del hormigón no se ve afectada por esta sintomatología ya que no implica expansión ni fisuramiento en la estructura.

Las coronas de reacción, se dan en el borde de los agregados reactivos, pueden identificarse a simple vista aunque en ocasiones puede darse de manera microscópica (Figura 3.8d). En general tienen un color blanquescino aunque pueden estar teñidas con óxidos de hierro, adquiriendo un color pardo.

3.3 Influencia de agregados basálticos en la RAS

Cuando se utilizan agregados basálticos como componente pétreo en el hormigón hay que tener en cuenta dos parámetros vinculados a la RAS. Uno de ellos es la variación textural y mineralógica, la composición y la paragénesis mineral que, en muchas ocasiones, no son tenidas en cuenta al estudiar los diferentes bancos de canteras. El segundo aspecto es la naturaleza y distribución de los minerales secundarios derivados de la alteración de la paragénesis inicial (Avid *et al.*, 2014).

La alteración deutérica es característica en las rocas volcánicas, y constituye otro parámetro a tener en consideración cuando se evalúa la potencial reactividad de los agregados basálticos. Los minerales secundarios producto de esta acción son fundamentalmente esmectitas y zeolitas. Las fases primarias más sensibles a la disolución y reemplazo por minerales arcillosos son el olivino y la mesostasis vítrea (Schenato *et al.*, 2003).

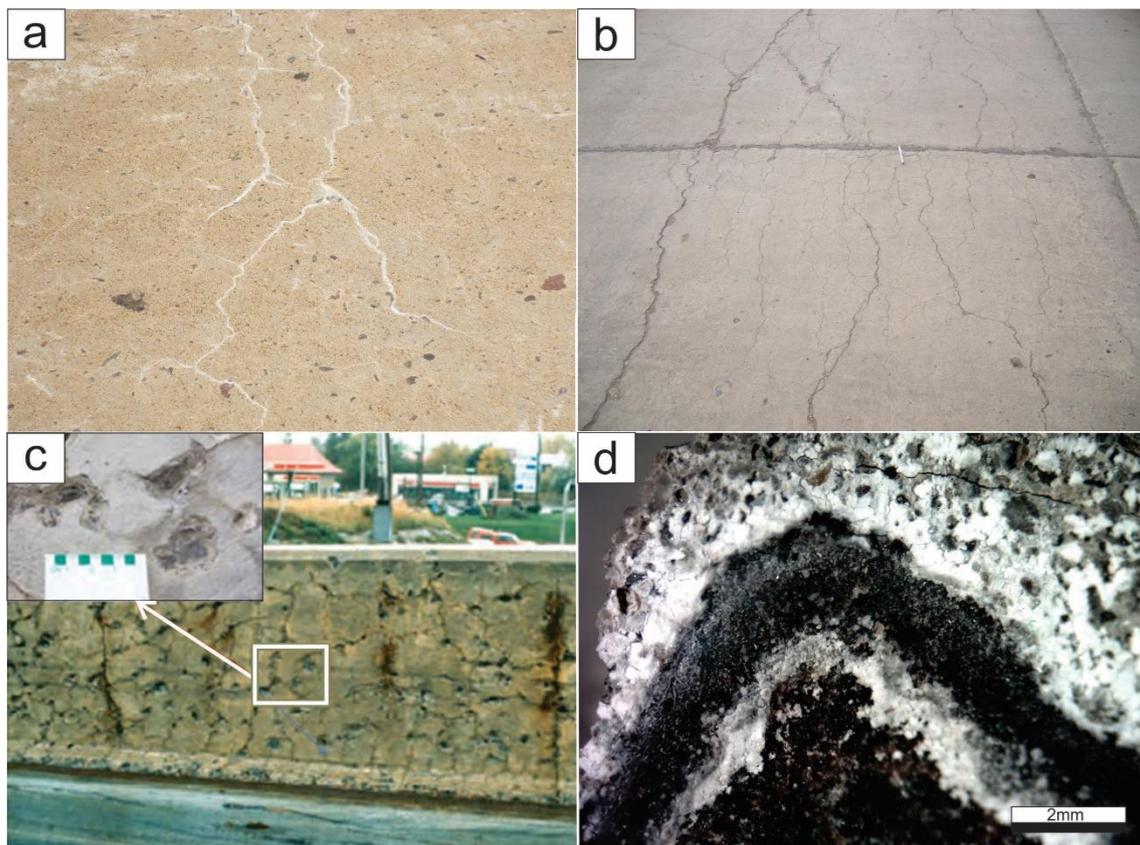


Figura 3.8.a. Patrón de distribución tipo mapa con exudación de gel en superficie. b. Fisuras orientadas en pavimento. c. Desprendimiento del mortero, “pop-outs”. d. Coronas de reacción visto con estereomicroscopio.

Algunos autores vinculaban la alteración de la roca, principalmente a montmorillonita, debido al intemperismo. Sin embargo estudios realizados sobre las coladas basálticas de la Formaciones Serra Geral y del Grupo Drakensberg en Sudáfrica en función de sus características petrográficas y petrológicas indican su vinculación con eventos de alteración deutérica o reacciones metamórficas de bajo grado durante el enfriamiento de las coladas (Sumner *et al.*, 2009). Davidson (1973) postuló tres tipos de alteración

deutérica: arcillosa, carbonática y zeolítica. Si bien, la mineralogía de las rocas basálticas parece sencilla basándose en que sus constituyentes principales son pocos (piroxenos, plagioclasas, olivinos) los minerales accesorios y de alteración, como los mencionados en el párrafo anterior pueden contribuir al desarrollo de la reacción.

En Argentina las primeras experiencias realizadas a mediados de la década del '60, con basaltos de la Mesopotamia confirmaron su reactividad potencial la cual fue atribuida exclusivamente a la presencia de vidrio volcánico (Giovambattista, 1977; Giovambattista *et al.*, 1981; 1985; 1986; Wainsztein *et al.*, 1989). Batic *et al.* (1992); Batic y Milanesi (1995) y Maiza *et al.* (1995), entre otros autores, basándose en ensayos de laboratorio (método acelerado de la barra de mortero) postulan que la esmectita, diseminada en forma intersticial en la masa del basalto, al ser degradada por el ataque alcalino, aporta sílice y álcali soluble a la solución de poro, contribuyendo a la RAS.

Al ser un aspecto controvertido, las arcillas esmectíticas estaban consideradas como un componente deletéreo, especificando un contenido máximo de un 2% (IRAM 1531). El avance de los estudios, en base a su rol en el hormigón permitió que en 2012, la norma fuera modificada incluyendo a éstas dentro de las sustancias nocivas y no como un componente deletéreo.

Milanesi y colaboradores (2008), basados en estudios donde se utilizaron agregados gruesos basálticos de la zona de Corrientes, afirman que el aporte de álcalis al hormigón puede ser despreciable y plantean que la presencia de esmectita, podría conducir al deterioro del hormigón por su gran inestabilidad volumétrica en función de la humedad, sin embargo su presencia no necesariamente guarda relación directa con el grado de reactividad de la roca. En el mismo trabajo concluyen que la identificación de esmectita en basaltos, como producto de la desvitrificación del vidrio volcánico, sugiere la presencia de otras variedades de sílice reactiva asociada (cristobalita y tridimita) y como tal constituye una alerta en el examen petrográfico sugiriendo la implementación de la evaluación del residuo insoluble en la roca, en ácido fosfórico, siguiendo la metodología propuesta por RILEM AAR-1, anexo A.6.2 (2016).

A nivel internacional, en más de una ocasión se ha informado sobre comportamientos perjudiciales en ciertas rocas de este tipo (Shayan y Quick 1988; Batic *et al.*, 1994; Wakizaka 2000; Korkanc y Tuğrul, 2005). Shayan y Quick (1988) afirmaron que los basaltos de Queensland, Australia con una matriz vítrea, con contenidos del 67% en peso de sílice, eran altamente reactivos frente a los álcalis. Según Katayama *et al.* (1989) los basaltos con más del 50% en peso de sílice total deberían considerarse como potencialmente reactivos.

Korkanç y Tuğrul (2005) estudiaron los basaltos de Anatolian, Turquía, en términos de su reactividad y concluyeron que ésta, estaba controlada por la presencia de vidrio volcánico, minerales de alteración y por el contenido de SiO₂ en la roca (superior al 50%). Los basaltos que tienen un carácter intermedio o vidrio volcánico en su matriz mostraron, en sus experiencias realizadas, una expansión superior al 0,10% a los 14 días utilizando el método CSA A23.2-25A (2014), similar a AAR-2 (2016). El gel de reacción, fue identificado mediante observaciones con SEM como el producto de reacción principal, alojándose en la superficie del agregado y en la interfase mortero-agregado.

Tiecher *et al.* (2012) con el fin de evaluar la Influencia de la mesostasis de rocas volcánicas, en la RAA, comparó los resultados de reactividad obtenidos en basaltos y riolitas. Además del examen petrográfico y DRX, los autores utilizaron SEM-EDS para el análisis modal de las mesostasis y realizaron barras de mortero (método acelerado) según lo lineamientos brasileros NBR 15577-4 (2018), similar a las normas americanas y canadienses, ASTM C1260 (2014) y CSA A23.2-25A (2014), respectivamente. Los autores concluyeron que los granos de cuarzo de la mesostasis son el principal proveedor de sílice soluble cuando una roca volcánica, como el basalto, está en contacto con una solución alcalina. Sin embargo, plantearon que la cantidad de cuarzo en basaltos no es lo suficientemente significativa como para promover la RAS en situaciones reales. Además consideraron que los ensayos de expansión acelerada simulan condiciones muy agresivas (alta alcalinidad y temperatura), lo que causa una

rápida disolución del cuarzo microcristalino de la mesostasis, ocasionando una rápida expansión inicial y una estabilización posterior (Figura 3.9). En comparación, las rocas volcánicas ácidas, como las riolitas, tienen un mayor potencial de dañar las estructuras de hormigón, ya que la sílice disponible proviene tanto del vidrio como de los microlitos de cuarzo inmersos en la mesostasis. Por lo tanto, concluyeron que la cantidad de sílice disponible en las rocas volcánicas utilizadas en la elaboración de hormigón es crítica para predecir su reactividad.

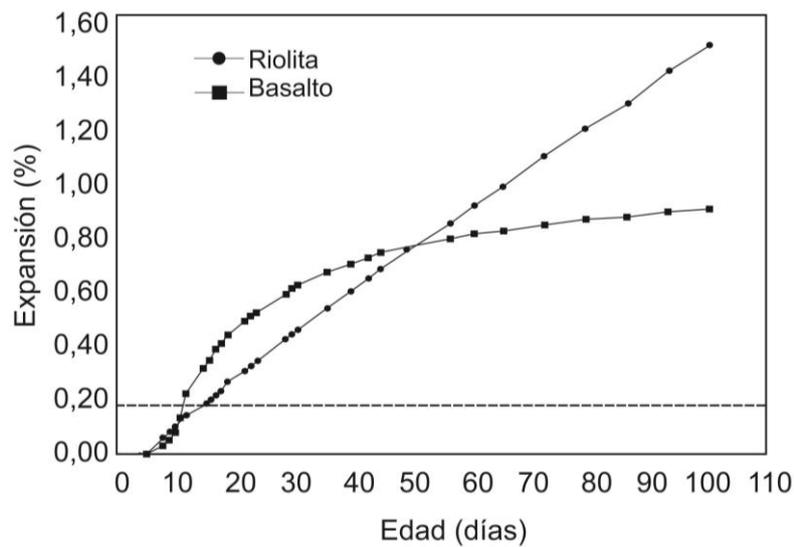


Figura 3.9. Expansión vs.edad en según el método acelerado de la barra de mortero basado en la norma NBR 15577-4 (Tomado de Tiecher *et al.*, 2012).

Esteves y colaboradores (2017) basándose en 12 muestras de rocas volcánicas seleccionadas de diferentes áreas del mundo adjudicaron en gran parte la reactividad de agregados basálticos al contenido de sílice que presente el vidrio volcánico. También llegaron a la conclusión que las fases de sílice relacionadas con la mayor reactividad de la roca son ópalo, vidrio volcánico (cuando el contenido de sílice es superior al 65%) y calcedonia. Las fases de sílice identificadas en sus estudios por análisis de DRX están en baja proporción y son aquellas que generalmente se pueden observar en el análisis petrográfico. Sin embargo, en sus estudios el método del ácido fosfórico demostró ser crucial para las rocas volcánicas, ya que reveló fases de sílice reactivas (cristobalita y ópalo) que no se observaron bajo el microscopio, debido al

tamaño de grano muy fino de este tipo de roca y al bajo contenido de estos componentes.

Medeiros *et al.* (2017) basaron sus estudios en la representatividad de los ensayos físicos, analizando un total de 16 muestras (basaltos, traquibasaltos, traquitas y basanitas), provenientes de Portugal. Realizaron exámenes petrográficos, SEM-EDS, análisis geoquímicos y ensayos físicos (método acelerado de la barra de mortero y prismas de hormigón). La mayoría de las rocas fueron calificadas como no reactivas con casi todos los métodos empleados. Sin embargo algunas de ellas son potencialmente reactivas según el examen petrográfico, debido a la presencia de vidrio volcánico, componentes silíceos y arcillas. Los resultados de los ensayos de expansión indican que todas las rocas califican como no reactivas, a excepción de una muestra de traquita, que se calificó como reactiva en el método acelerado de la barra de mortero. Los ensayos del prisma de hormigón a 38°C muestran que algunos de los agregados parecen tener cierta reactividad después de 2 años de ensayo. Sin embargo, el método considera el tiempo de evaluación a 1 año de acuerdo con las recomendaciones de ASTM C 1260 (2014). De aquí surge una de las controversias del método, relacionada con el período de tiempo en el que se desarrolla el ensayo. Los autores sugieren que los ensayos de expansión vigentes en la actualidad podrían tener que ajustarse en temperatura de exposición, umbral o duración para que sean adecuados para la caracterización de este tipo de roca.

3.4 Normas utilizadas para evaluar la RAS

Las primeras estructuras de hormigón que evidenciaron manifestaciones debidas a la RAS datan de 1920, estas manifestaciones crearon la necesidad de evaluar este tipo de patología y de realizar estudios previos en los agregados ya que la RAS se puede evitar si se toman los recaudos necesarios. Hasta mediados de los años cincuenta era admitida la hipótesis de Feret (1937) según la cual, la naturaleza mineralógica de los áridos no tenía ninguna influencia en el comportamiento del hormigón endurecido.

Como ya se ha mencionado, Stanton (1940a) fue el primer autor en atribuir el deterioro de una presa a la interacción entre los áridos y los álcalis del cemento.

Para obtener una buena durabilidad de las obras es necesario conocer el posible comportamiento de los componentes del hormigón, en particular el de los agregados, previo al uso, a fin de determinar y en lo posible evitar posibles reacciones deletéreas. El ACI, Committee 201 (1968) definió como *durabilidad* de un hormigón a su capacidad para resistir a la acción ambiental, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, y considera que un hormigón durable mantendrá su forma original, calidad y serviciabilidad cuando sea expuesto a su ambiente en obra.

Conociendo este concepto, la American Society for Testing and Materials (ASTM) fue quien redactó una de la primeras ediciones de ensayos normalizados para la evaluación de la RAS. En 1950 surgió la primer versión de la ASTM C227 (Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations, Mortar-Bar Method), la ASTM C289 (Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, Chemical Method) publicada por primera vez en 1952, y la ASTM C295 (Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete) publicada inicialmente en 1954. Estos métodos fueron los más utilizados para determinar la reactividad entre los agregados y el cemento, posteriormente y con el avance en el conocimiento de la RAS, fueron surgiendo modificaciones y actualizaciones según el país.

Todos los métodos presentan ventajas y limitaciones es por esto, que no es posible definir la reactividad de un agregado en base a los resultados de un único ensayo (Bérubé y Fournier, 1992; Fournier y Bérubé, 2000). Los métodos de evaluación más confiables son los de largo plazo, ya que simulan condiciones más reales, aunque existe una tendencia, debido a los tiempos de la industria, hacia la búsqueda de ensayos acelerados, que permitan disminuir los tiempos de respuesta sin pérdida de confiabilidad (Rogers y Hooton, 1989; Bérubé y Fournier, 1992; Grattan-Bellew, 1996; RILEM TC 106-AAR, 2000a; Batic *et al.*, 2010; Falcone y Milanese, 2012a y b).

Principalmente se realizan tres tipos de ensayos: los que estudian al agregado en estado natural (examen petrográfico, normas IRAM 1649, 2008 o ASTM C295, 2012), los que utilizan mortero (método de la barra de mortero, norma IRAM 1637, 1992 o ASTM C227, 2010) y método acelerado de la barra de mortero (norma IRAM 1674, 1997 o ASTM C 1260, 2014) y los que estudian al hormigón en su totalidad (método del prisma de hormigón, norma IRAM 1700, 2012 o ASTM C 1293, 2008). El grado de confianza de los estudios y el tiempo que demandan para la ejecución es distinto teniendo mayores expectativas sobre los que involucran mayores variables (cemento, agregados finos, agregados gruesos) y demandan más tiempo (1 a 2 años) en función de la mineralogía de los agregados. La secuencia que se realiza rutinariamente es (Batic y Falcone, 2010):

- Análisis petrográfico
- Ensayo con el método acelerado de barras de mortero
- Ensayo de prismas de hormigón

Si el agregado se califica como potencialmente reactivo en el examen petrográfico, se deben realizar ensayos sobre morteros (cemento y agregado fino o grueso triturado) y por último, para confirmar, se debe estudiar el hormigón (cemento, agregado fino y agregado grueso). Si con los métodos de ensayo físicos se confirma la reactividad de la roca, se toma en consideración el comportamiento de los agregados en obra (IRAM 1531, 2012).

El examen petrográfico IRAM 1649 (2008) vigente desde 1968 en Argentina, ASTM C295 (2012) en USA, RILEM AAR-1 (2016) en Europa, se considera una herramienta indispensable pero no definitiva, para la caracterización de los agregados. Si bien ha sufrido modificaciones, la misma ha perdurado a través del tiempo. El estudio se realiza generalmente con estereomicroscopio o microscopio óptico sobre secciones delgadas, además de técnicas complementarias como DRX o SEM. En el caso de los agregados gruesos para hormigón de cemento, se complementa con los lineamientos de las normas IRAM 1531 (2012) y CIRSOC, 201 (2005).

El reglamento argentino de estructuras de hormigón establece que cuando se utilicen agregados, que contengan cualquiera de los siguientes minerales en cantidades mayores que las indicadas, deben ser considerados potencialmente reactivos (CIRSOC201, 2005):

- Cuarzo tensionado, microfracturado o microcristalino, 5 %
- Chert y/o calcedonia, con trazas de ópalo incluidas en su masa 3 %
- Tridimita y/o cristobalita 1 %
- Ópalo 0,5 %
- Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas 3 %
- Arcillas del tipo esmectitas contenidas en la masa de basaltos 2 %

La norma IRAM 1531 (agregado grueso para hormigón de cemento) en su última modificación del año 2012 establece los mismos límites que los mencionados en el CIRSOC, aunque ha eliminado las arcillas esmectíticas ya que no son considerados materiales potencialmente reactivos y los incluye dentro de sustancias perjudiciales con un límite admisible máximo de 5%. También establece que cuando el agregado contenga dos o más minerales/rocas potencialmente reactivos, debe ser considerado potencialmente reactivo independientemente del porcentaje en que estén presentes.

Aquellos agregados que, de acuerdo con la evaluación anterior, no resulten potencialmente reactivos pueden ser utilizados sin restricciones por la RAS. En caso contrario, la reactividad debe ser comprobada por el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) o por el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2012) conforme lo indica la norma. El examen petrográfico también pone limitaciones en cuanto al porcentaje de sustancias nocivas, cuya suma debe ser como máximo 5,0%.

El método de la barra de mortero IRAM 1637 (1992), ASTM C 227 (2010), fue una de las primeras normas utilizadas para evaluar la RAA. Con el paso del tiempo y la aparición de nuevas técnicas el método fue desplazado hasta quedar en desuso. El largo periodo de ensayo (1 año o más) y la falla en la detección de agregados de reacción lenta (Sarkar *et al.*, 2004) llevaron a que, poco a poco, la norma fuera

remplazada por el método acelerado de la barra de mortero, IRAM 1674 (1997), ASTM C1260 (2014) o CSA A23.2-25A (2014) siendo el más difundido a nivel internacional. Este método permite la detección rápida, 16 días, del potencial deletéreo de los agregados frente a la RAS. Sin embargo diversos autores (Bérubé *et al.*, 1992) desde hace tiempo cuestionan la representatividad de los resultados ya que el método es muy agresivo y sobreestima los resultados cuando se los compara con las condiciones de obra. De esta forma el método puede calificar ciertos agregados como potencialmente reactivos, siendo que su comportamiento en obra es satisfactorio. Por otra parte, se han planteado interrogantes acerca de su confiabilidad, especialmente cuando se emplea en la caracterización de agregados gruesos (Thomas *et al.*, 2008), ya que la norma establece una granulometría para la confección de las barras, que no es la utilizada en el hormigón. Otro punto crítico en la norma es la interpretación de los resultados. La misma establece que valores de expansión menores al 10% a 16 días después del moldeo, los agregados se consideran inocuos frente a la RAS y aquellos que superen el 20% indican una expansión potencialmente deletérea. A pesar de estos límites, valores las expansiones intermedios, han demostrado incluir tanto agregados inocuos como deletéreos siendo necesaria algún tipo de información complementaria de los agregados. En tales situaciones la norma sugiere extender el ensayo a 28 días. La Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos explica que si la decisión es extender el ensayo a 28 días se debe tener mucho cuidado con lo que se conoce, como resultados falso-negativos (agregados clasificados como inocuos por el ensayo y que presentaron efecto deletéreo en campo) y falso-positivos (agregados clasificados como reactivos por el ensayo y que desempeñaron buen comportamiento en campo) (Thomas *et al.*, 2008).

El método del prisma de hormigón IRAM 1700 (1997), es considerado actualmente como el método más real y confiable que existe para evaluar la reactividad alcalina de los agregados (Bérubé y Fournier, 1993; Grattan-Bellew, 1989; Batic y Milanesi, 1995; Milanesi y Batic, 1994) y ha sido adoptado por las principales entidades de normalización del mundo (ASTM C 1293, 2008; RILEM AAR-3, 2000 y CSA A23.2-14A, 2014). Tiene sus orígenes en la década del '50 y fue continuamente calibrado y

modificado a través de los años, evolucionando sus condiciones para garantizar que todos los agregados reactivos conocidos fueran correctamente identificados (Rogers *et al.*, 2000). Pese a esto, el largo periodo que demanda su ejecución, hace poco viable su aplicación práctica. La norma se utiliza tanto para evaluar agregados finos como gruesos, con una granulometría similar a las de un hormigón de obra, lo cual es considerado una ventaja en cuanto a su representatividad y establece un valor límite de expansión de 0,04% a la edad de 12 meses.

Bajo la necesidad de buscar un método de ensayo “ideal”, que sea confiable, acelerado y de aplicación universal, en 2010 el LEMIT comenzó un programa de estudio destinado a evaluar el desempeño del denominado “método acelerado del prisma de hormigón” originalmente propuesto por Ranc y Debray (1992). El método, de origen chino (Lu *et al.*, 2008), similar al IRAM 1700 (2012) consiste en acelerar el proceso de reacción a través de un incremento en la temperatura de curado (de 38°C a 60°C) bajo condiciones de alta humedad y ha tenido gran aceptación a nivel internacional (Lu *et al.*, 2008; Lindgård *et al.*, 2010). En comparación con el tradicional método IRAM 1700, este se destaca por la aceleración en la obtención de los resultados (de tres a cinco meses) manteniendo su reproducibilidad (24 meses) (Fournier y Roger, 2008). También el método posee mayor eficiencia para la identificación de agregados de reacción lenta (Shayan *et al.*, 2008). El Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), a fin de evaluar el desempeño del método, comparó las respuestas del método, con los resultados obtenidos bajo los lineamientos de la norma IRAM 1674 (1997) e IRAM 1700 (2012), realizando un análisis crítico de las ventajas y desventajas del método y proponiendo los límites de expansión para evaluar la reactividad alcalina potencial de los agregados que se utilizan en el país. De las experiencias realizadas, se propuso un límite máximo distinto, en función al agregado que se esté evaluando. El límite máximo se establece en 0,04% a las 13 semanas, a excepción de los agregados que contengan cuarzo tensionado y/o microcristalino, donde se aplica un límite máximo del 0,08%. Esta diferenciación se plantea para evitar los falsos-positivos y falsos-negativos que se dan en el ensayo IRAM 1674 (1997) (Falcone y Milanese, 2012b). Los mismos autores, comparando los

resultados entre prismas de 38°C y 60°C, afirman que los valores de expansión obtenidos con agregados de reacción lenta, son más elevados en comparación al método IRAM 1700 (2012) convencional, ratificando la diferenciación en los límites, y juzgando la reactividad de los agregados en conjunto con su mineralogía. Gracias a estas investigaciones, en Argentina este método de ensayo ha sido recientemente incorporado, año 2016, a la IRAM 1700 (2012) como Anexo normativo, tomando como consideración antecedentes existentes en el país (Falcone *et al.*, 2008; Batic *et al.*, 2010; Batic y Falcone 2010; Falcone *et al.*, 2011).

Existen métodos de ensayo químicos, como IRAM 1650 (1968), basado en la norma ASTM C289 (2007) que permiten estimar, la reactividad potencial de los agregados síliceos. Son métodos rápidos, con ejecuciones menores a una semana, que se aplicaba principalmente cuando no se contaba con el tiempo suficiente para realizar el ensayo del prisma de hormigón, pero con el desarrollo de los ensayos acelerados, los métodos de carácter químico fueron perdiendo interés. Los resultados son referidos a la cantidad de sílice que libera el agregado y a la reducción de alcalinidad de la solución. Ambos parámetros se grafican expresados en mmol/l, diferenciando mediante una curva teórica los agregados inocuos de los potencialmente reactivos. Dentro de las principales desventajas, se cita que el método IRAM 1650 no funciona para la detección de agregados de reacción lenta (Stark *et al.* 1993, Sarkar *et al.* 2004) debido a la excesiva reducción de alcalinidad producida por la reacción del NaOH con algunos carbonatos, que interfieren en los resultados (Chaiken y Halstead 1960). Por otro lado la fracción utilizada para el ensayo, influye notablemente en la superficie específica de la muestra por tratarse de un tamaño muy reducido (entre 300µm y 150µm), haciéndola más susceptible al ataque por parte de la solución alcalina, sobreestimando el comportamiento del agregado. Marfil *et al.* (1995) aplicaron el método químico sobre diversos agregados de reacción rápida, como es el caso de los basaltos de distintos afloramientos de Argentina, comparando los resultados con la expansión medida en barras de mortero y consideraron que valores de sílice disuelta superiores a 20mg se correlacionan con rocas calificadas como potencialmente reactivas en los ensayos físicos, valores menores a los 10mg inocuas y entre 10mg y 20mg dudosas.

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe la ubicación de las canteras estudiadas y el método de muestreo aplicado, tanto en los frentes de explotación como en pilas de acopio. También se detallan los métodos empleados en la caracterización de la reactividad alcalina de los agregados basálticos estudiados. Los métodos de estudio de la RAS pueden ser aplicados sobre testigos de roca o muestras de agregados, morteros y hormigones. En general la evaluación se realiza en forma combinada utilizando técnicas cuantitativas (medición de cambios de longitud) y cualitativas (observación de cortes delgados). Se realizaron además otros ensayos no convencionales tales como el estudio petrográfico de morteros y prismas de hormigón post ensayo y de hormigones de obra realizados con los agregados estudiados, análisis por difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido-EDS y análisis químicos, entre otros.

4.1 Materiales

Las rocas estudiadas provienen de 5 canteras, 4 ubicadas en la provincia de Corrientes y 1 en Entre Ríos, las cuales actualmente se encuentran en actividad (Figura 4.1).

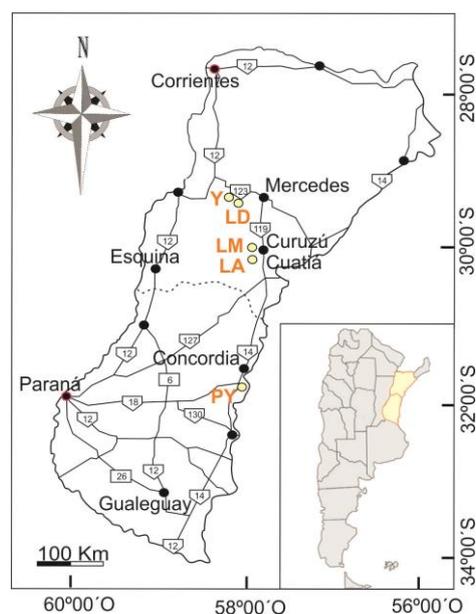


Figura 4.1. Mapa de ubicación y acceso de las canteras relevadas.

A continuación se detalla la ubicación de las mismas y las principales características de cada uno de los niveles relevados.

4.1.1 Cantera “L.A” (S 29° 48’8,37’’ - O 58° 8’ 14,35’’)

Se accede a través de la RN N°119, a 5km al oeste de la localidad de Cruzú Cuatiá, provincia de Corrientes. La cantera tiene un diseño irregular (Figura 4.2.a) y cuenta con tres niveles (Figura 4.2.b). Esta cantera estuvo inactiva por varios años. Al momento del relevamiento se estaba reiniciando la actividad. Se tomaron dos muestras en el nivel inferior (NI), tres en el nivel medio (NM) y tres en el superior (NS). Todos los frentes de explotación en esta cantera presentan potencias similares que varían entre los 3m y 5m.

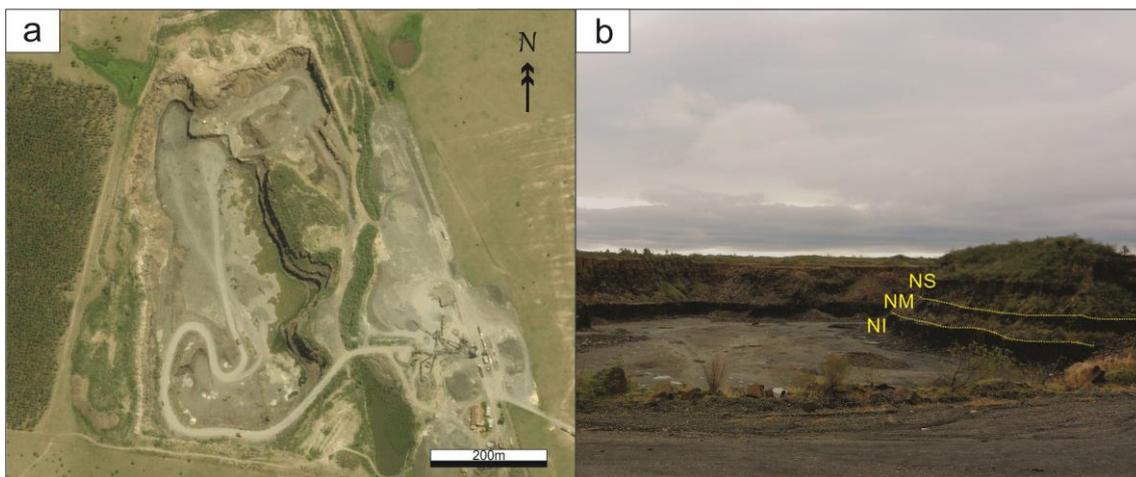


Figura 4.2. a. Vista satelital de la cantera L.A. b. Vista a nivel de la cantera.

NIVEL SUPERIOR	
	<p>Superior:</p> <p>Este nivel corresponde al “techo” de la cantera y evidencia una fuerte meteorización producto de desarrollo de suelo en contacto con la roca. Es una roca color rojiza, microcristalina, moderadamente diaclasada. Las paredes de las fracturas están carbonatizadas. Se reconocen sectores moteados por minerales oxidados de hierro</p>
	<p>Medio:</p> <p>Roca es de color gris oscuro, de grano muy fino, de textura afanítica, fractura irregular, masiva y compacta. Presenta muy leve fracturamiento, en ocasiones con pátinas de óxidos de hierro en los planos de fractura como se indica en la imagen. Se reconocen venillas rellenas de carbonato de calcio y/o sílice.</p>
	<p>Inferior:</p> <p>La roca es de color gris oscuro, con zonas superficiales diferenciadas por procesos oxidación. Es de grano muy fino, masiva, compacta, con moderado diaclasamiento. En ocasiones estas fracturas están rellenas por carbonato de calcio y/o sílice, como se indica en la imagen.</p>

NIVEL MEDIO



Se caracteriza por ser un nivel homogéneo. La roca es de grano muy fino, de color gris oscuro, textura afanítica, fractura irregular, masiva y compacta.

Presenta denso diaclasamiento tanto en sentido vertical como horizontal respecto al frente de explotación. Se reconoce escasa alteración superficial.

NIVEL INFERIOR



Este nivel corresponde a la base de la cantera y se compone de una roca homogénea compacta y masiva de coloración gris oscura, en sectores con tonalidades rojizas producto de procesos de meteorización superficiales.

Presenta un diaclasamiento abierto y esporádico dando lugar a la formación de grandes bloques de roca.

4.1.2 Cantera “L.M” (S29° 42’ 7,50’’ - O 58° 5’ 12,30’’)

Ubicada a 11km hacia el norte de la localidad de Curuzú Cuatiá y sobre la RN N°119. Presenta un diseño regular (Figura 4.3.a y b). El nivel inferior tiene aproximadamente 5 metros, mientras que los niveles medio y superior alcanzan los 10 metros de altura. En cada uno de ellos se recolectaron tres muestras.

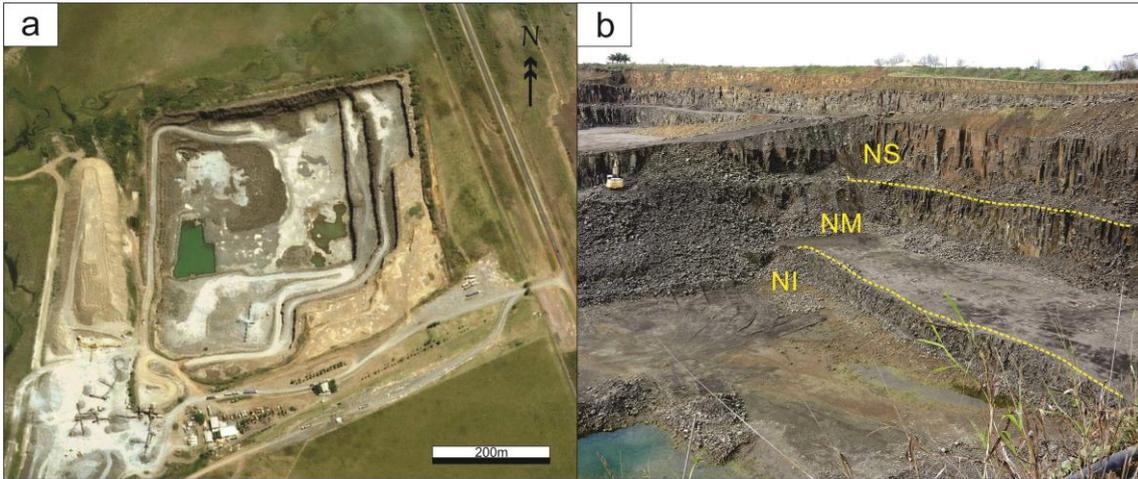
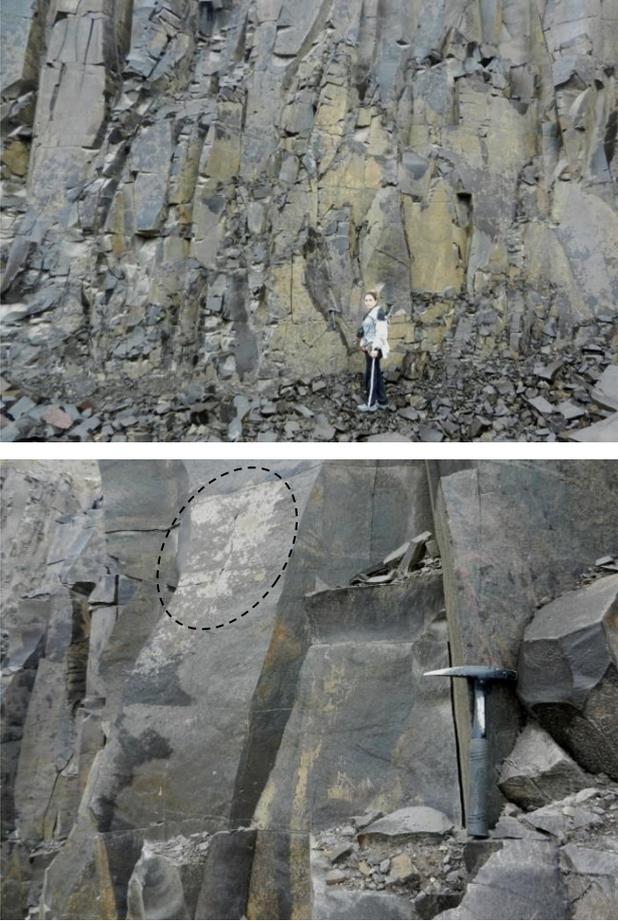


Figura 4.3. a. Vista satelital de la cantera L.M. b. Vista a nivel de la cantera.

NIVEL SUPERIOR	
	<p>Superior y Medio:</p> <p>En la imagen se puede observar la transición entre el NSs y el NSm. El primero presenta una tonalidad pardo clara, producto de la intensa meteorización que ha sufrido la roca. Se encuentra fracturada principalmente paralelo al desarrollo del suelo.</p> <p>El NSm es de color pardo oscuro, compuesto por una roca masiva, de grano fino, con fuerte oxidación superficial.</p>

	<p>Inferior:</p> <p>Es una roca de color pardo claro, con evidencias de desferrización diferencial que gradúa decreciendo hacia el interior de la masa. Es compacta, densa y está fuertemente diaclasada sin material de relleno en los interespacios.</p>
---	--

NIVEL MEDIO	
	<p>Es un nivel muy homogéneo, de una roca color gris oscuro, de grano muy fino, textura afanítica, fractura irregular, masiva y compacta. Su diaclasamiento es abierto y esporádico dando lugar a la formación de grandes fragmentos de roca. Presenta, en sectores localizados, un moteado característico de colores más claros, atribuidos a la concentración de minerales arcillosos. Además se observan precipitaciones blanquecinas de carbonato de calcio como se señala en la imagen.</p>



4.1.3 Cantera "L.D" (S 29° 8'11,00" - O 58°20'43,50")

Se ubica al norte de la provincia de Corrientes accediendo por la RN N°123, frente a la localidad de Felipe Yofre, unos 4km al sur. La cantera tiene un diseño regular (Figura 4.4.a), cuenta con tres niveles inferior, medio y superior con potencias de 8m, 11m y 16m respectivamente (Figura 4.4.b). Se recolectaron 3 muestras en los niveles inferior y superior y dos en el nivel medio.

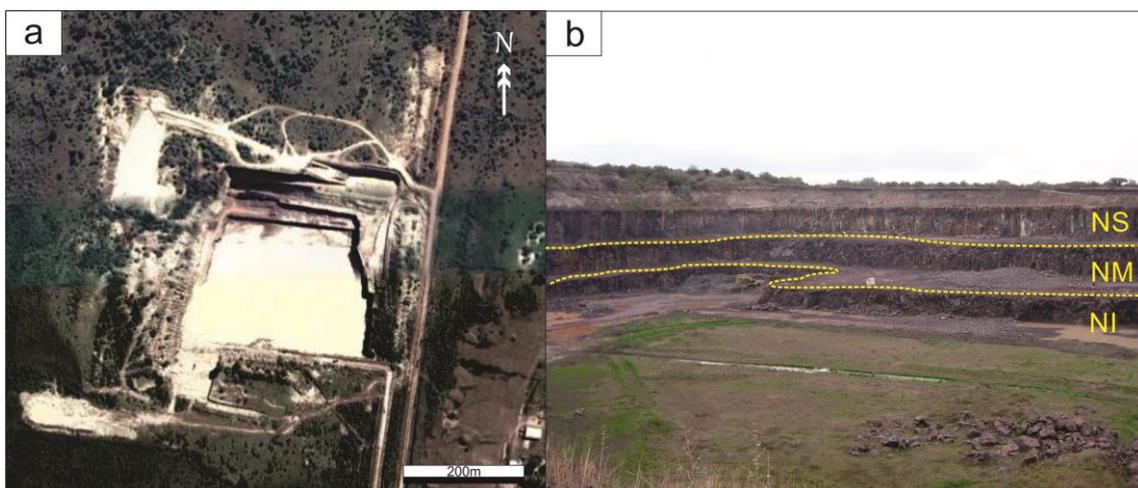


Figura 4.4. a. Vista satelital de la cantera L.D. b. Vista a nivel de la cantera.

NIVEL SUPERIOR



Es un banco muy homogéneo compuesto por una roca rojiza, microcristalina, de grano muy fino, con un diaclasamiento esporádico. Algunas paredes de las fracturas se encuentran tapizadas por minerales oxidados de hierro, las fisuras en su mayoría están rellenas por sílice criptocristalina.

NIVEL MEDIO



La roca es de coloración rojiza con zonas diferenciadas por procesos de argilización y oxidación, presenta un denso diaclasamiento. Se reconocen óxidos de hierro en los planos de fractura, además se observan, en sectores localizados, precipitaciones blanquecinas de carbonato de calcio. La textura de la roca es afanítica presenta fractura irregular, es masiva y compacta.

NIVEL INFERIOR	
	<p>Es un nivel homogéneo. La roca presenta evidencias de desferrización heterogénea. Es de color rojizo, de grano fino, masiva y compacta. Presenta un diaclasamiento moderado sin material de relleno en los interespacios.</p>

4.1.4 Cantera "Y" (S 29° 8'17,00" - O 58°21'43,50")

Se ubica a 2km hacia el oeste de la localidad Felipe Yofre. La cantera presenta un diseño irregular (Figura 4.5.a). El nivel inferior se encuentra inundado por lo cual solo se recolectaron muestras que corresponden al nivel inferior-medio e inferior-superior, registrando una altura visible de 2,5m aproximadamente. Los niveles restantes varían su potencia entre 12m y 15m, dependiendo del sector, de los cuales se tomaron 3 muestras en cada uno (Figura 4.5.b).

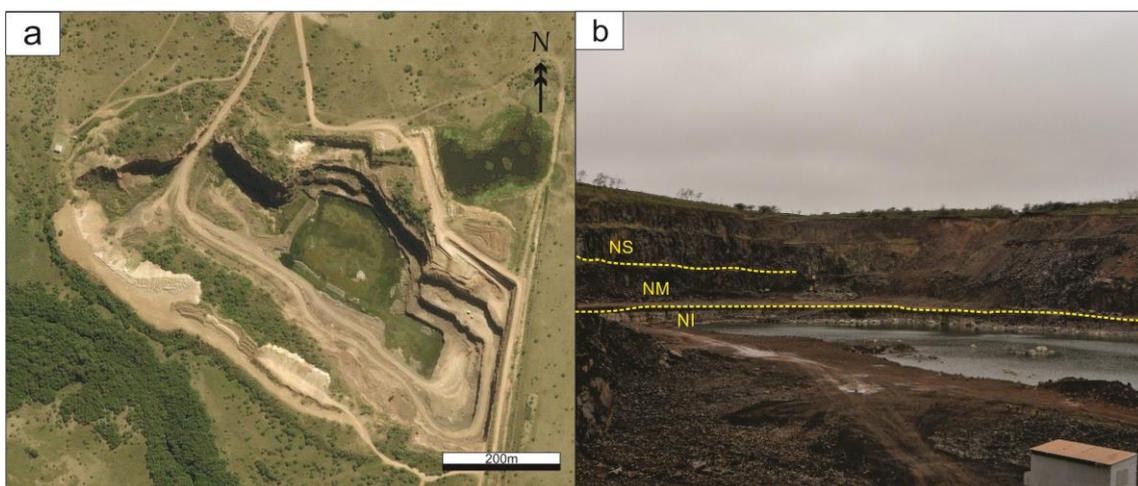


Figura 4.5. a. Vista satelital de la cantera "Y". b. Vista a nivel de la cantera.

NIVEL SUPERIOR



La roca es de color gris con características homogéneas, de grano muy fino y textura irregular. El diaclasamiento es moderado y algunas fisuras están rellenas con sílice criptocristalina y/o carbonato de calcio.

El cambio de coloración observado en la imagen se debe a la filtración de agua en el frente de explotación.

En la imagen inferior se muestra un detalle de las características de la roca.

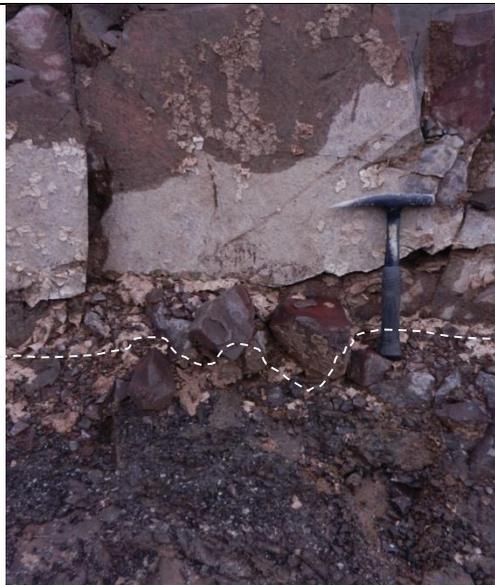
NIVEL MEDIO



La roca es de color rojo, de grano muy fino, textura afanítica, fractura irregular, masiva y compacta. Presenta diaclasamiento moderado.

El nivel está intruido por un dique de basalto negro, de características similares, con mayor grado de diaclasamiento. En las zonas de contacto entre ambas rocas se identificó una sucesión de minerales

		<p>arcillosos y sílice criptocristalina de hasta 3cm de espesor.</p> <p>Es común que los planos de fractura estén tapizados con carbonato de calcio.</p>
---	---	--

NIVEL INFERIOR		
	<p>Superior:</p> <p>En la imagen se puede observar la transición abrupta entre ambos niveles (línea punteada). Es una roca masiva, compacta, de grano fino. Es de color rojizo y escaso diaclasamiento. No se reconocen evidencias de alteración superficial.</p>	
	<p>Medio:</p> <p>La roca presenta un avanzado grado de meteorización. Es un basalto vesicular, poco compacto, deleznable. Las cavidades están rellenas con material arcilloso de color verde y blanquecino, de tipo esmectítico.</p>	

4.1.5 Cantera "P.Y" (S 31°33'49,89"- O 58° 0'21,25")

Se ubica en la provincia de Entre ríos a unos 4,5km al sureste de la localidad de Puerto Yeruá. El yacimiento presenta un diseño irregular (Figura 4.6a). El piso de la cantera se encuentra inundado y con material de derrumbe sobre el nivel inferior por lo que se pudo registrar y muestrear tan solo un banco de 3m. El nivel medio presenta unos 10m a 12m de potencia (Figura 4.6b). En todos se recolectaron 2 muestras por frente.

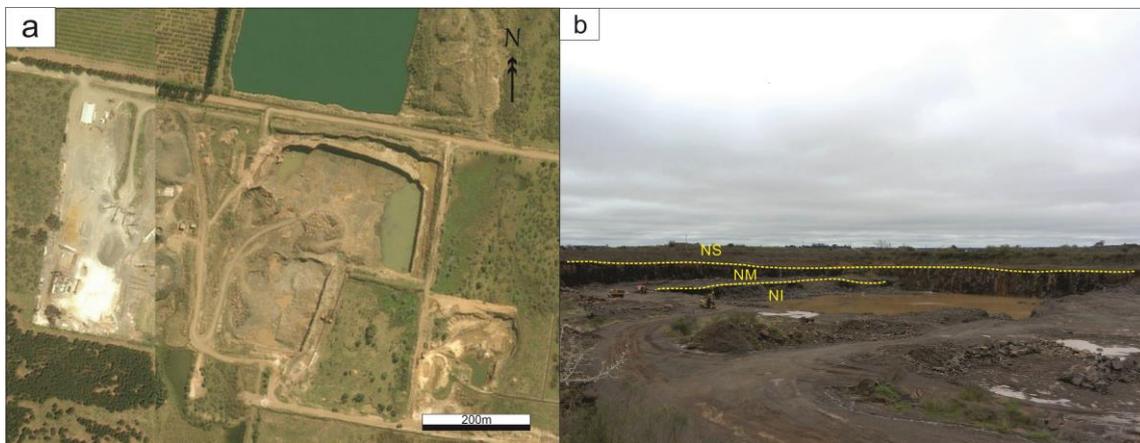
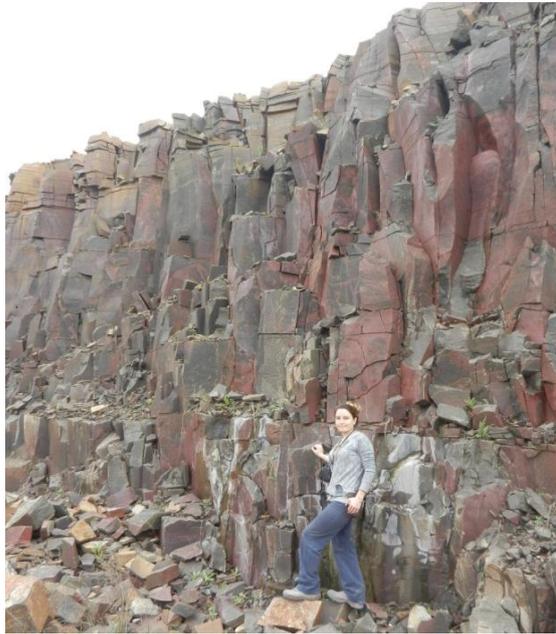


Figura 4.6. a. Vista satelital de la cantera "P.Y". b. Vista a nivel de la cantera.

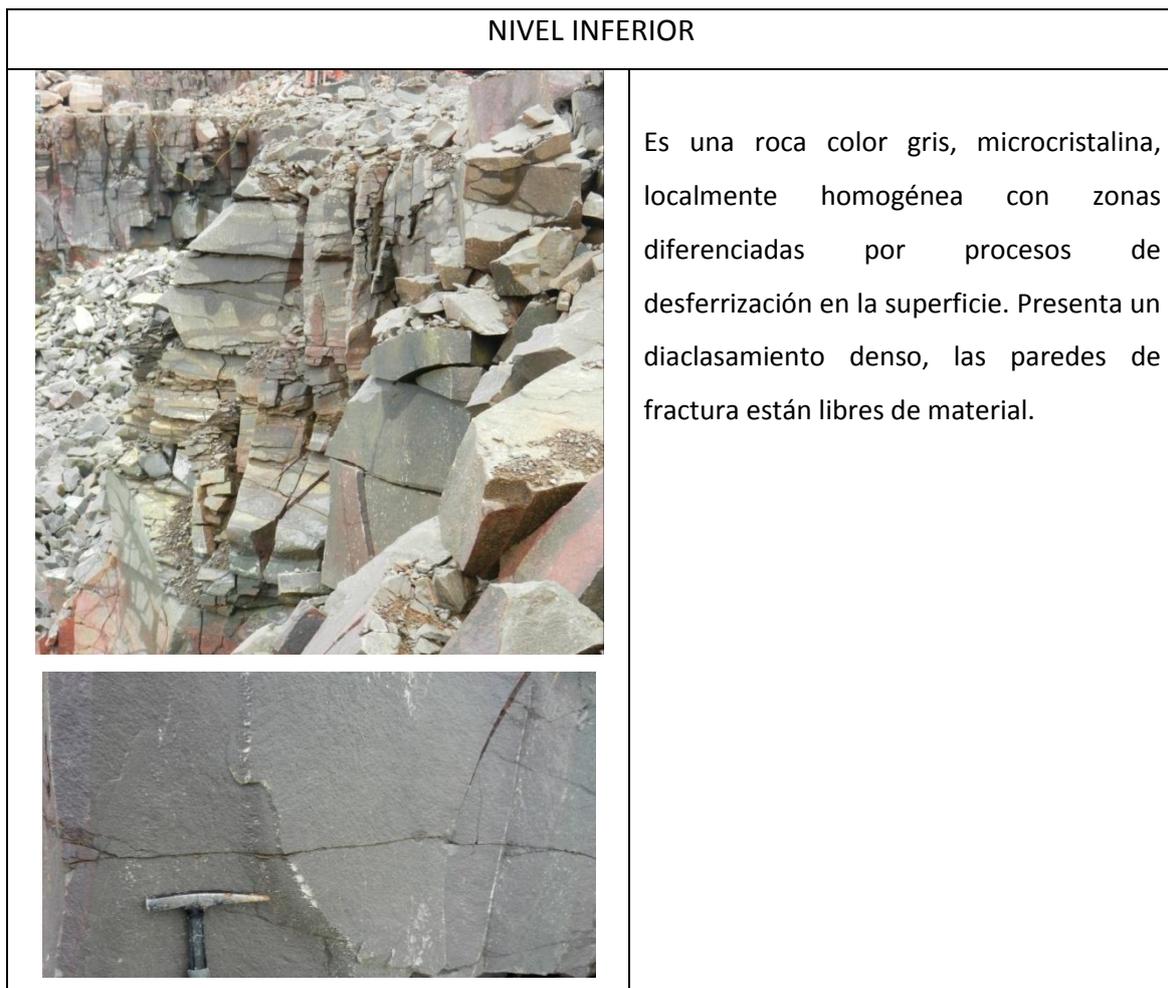
NIVEL SUPERIOR	
	<p>Es una roca color pardo rojiza, con un diaclasamiento denso. En las zonas de fractura se observan pátinas de óxidos de hierro. Es compacta, densa, de grano muy fino. Se observa una gran homogeneidad en el frente de explotación.</p> <p>En la imagen inferior se observa un detalle de las características de la roca.</p>

NIVEL MEDIO



Es una roca gris rojiza, microcristalina, con denso diaclasamiento. Las paredes de las fracturas están carbonatizadas. Algunas se encuentran tapizadas por minerales oxidados de hierro y sílice. La roca mayormente es masiva y compacta. En sectores localizados se reconocen venillas rellenas por sílice criptocristalina.





En cada cantera se realizó un muestreo vertical donde se recolectaron entre dos y tres muestras por cada nivel de explotación, dependiendo de la altura del frente y debido a que en algunos casos el piso estaba inundado. Un ejemplo del muestreo se ilustra en la Figura 4.7a. Sobre un total de 39 muestras de afloramiento, se realizó un estudio textural y mineralógico comparativo dentro de los distintos niveles de la cantera y también entre canteras. Para el estudio geoquímico se analizaron las muestras del sector medio de cada nivel (denominadas NM-inferior, NM-medio y NM-superior). En total se analizaron 15 muestras.

Por último, se realizó un muestreo sobre las pilas de acopio (Figura 4.7.b), de la fracción 6mm-20mm destinado la evaluación de la potencial reactividad frente a la RAS utilizando los ensayos normalizados físicos, químicos y petrográficos. Se recolectaron 50kg de cada material triturado. Las muestras, cuyo volumen fue del orden de los 2m³,

fueron reducidas por cuarteo en laboratorio para obtener las porciones utilizadas en los ensayos.

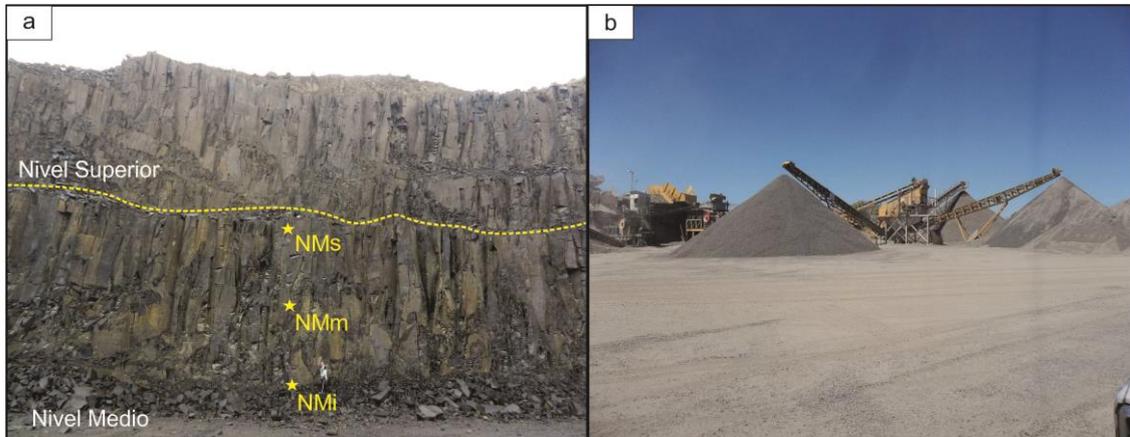


Figura 4.7 a. Método de muestreo implementado para cada frente de explotación. b. pilas de acopio del material triturado 6mm-20mm.

4.2 Métodos

4.2.1 Ensayos normalizados

4.2.1.1 Examen petrográfico - IRAM 1649 (2008)

El ensayo petrográfico es el primer paso de evaluación que se realiza sobre el agregado pétreo, se basa en el estudio mediante lupa binocular y microscopio óptico de polarización, bajo los lineamientos de la norma IRAM 1649 (2008). Durante la caracterización se tiene en cuenta, forma y textura superficial de la partícula, tamaño de grano, estructura interna, color, composición mineral, heterogeneidades significativas, condiciones físicas generales, recubrimientos e incrustaciones, presencia de constituyentes que causen reacciones químicas perjudiciales en el hormigón, grado de alteración, etc. El propósito es determinar las características mineralógicas y el grado de alteración, describir, clasificar y determinar las cantidades relativas de los constituyentes de la muestra debido a la gran influencia que tienen en el desempeño del material en el hormigón. El examen además debe establecer si el agregado

contiene minerales químicamente inestables que puedan generar perjuicios en el hormigón o materiales volumétricamente inestables, como las arcillas expansivas.

4.2.1.2 Agregado grueso para hormigón de cemento - IRAM 1531 (2012)

La norma tiene como objetivo establecer los requisitos que debe cumplir el agregado grueso ya sea constituido por gravas (canto rodado) naturales o partidas, piedra partida o por una mezcla de dichos materiales. Las partículas deben ser resistentes y durables, de forma y tamaño estable, y no deben contener sustancias nocivas en proporciones mayores que los límites establecidos en la Tabla 4.1 y cuya suma debe ser como máximo 5,0%.

Tabla 4.1. Sustancias nocivas. IRAM 1531 (2012)

Requisitos	Unidad	Máximo admisible	Método de ensayo
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100 g	2,0	IRAM 1647
Finos que pasan el tamiz IRAM 75 µm		1,0	IRAM 1540
- Agregados gruesos naturales			
- Agregados gruesos de trituración, libres de arcilla		1,5	
Materias carbonosas:		0,5	IRAM 1647
a) Cuando es importante el aspecto superficial			
b) Otros casos			
Sulfatos, expresados como SO ₃		0,075	
Otras sales solubles		1,5	
Ftanita (chert) como impureza:		1,0	IRAM 1649
- En exposiciones C1, C2 ¹⁾		2,0	
- En climas de exposiciones distintas a las correspondientes exposiciones C1, C2 ¹⁾		5,0	
Otras sustancias perjudiciales:		5,0	IRAM 1649
- Pizarras			
- Micas como principal componente de la partícula			
- Fragmentos blandos en escamas desmenuzables			
- Partículas cubiertas por películas superficiales			
- Esmeclitas, piritas, serpentinitas, zeolitas			

¹⁾ En clases específicas de exposiciones que pueden producir degradación distinta de la corrosión de armaduras, C1, C2, se encuentran detalladas en el anexo D de la norma IRAM 1531.

Se debe determinar la reactividad alcalina potencial del agregado, cuando este se emplee en hormigones que van a estar en forma permanente o periódica en contacto con agua, suelos húmedos o atmósfera con humedad relativa mayor al 60%. El análisis petrográfico debe realizarse según la norma IRAM 1649 (2008), para identificar los componentes potencialmente reactivos. Si el agregado contiene cantidades mayores de cualquiera de los minerales indicados en la Tabla 4.2, debe ser considerado potencialmente reactivo frente a la RAS. Los límites deben ser aplicados a cada uno de los agregados individualmente, si este contiene dos o más de los minerales indicados en la tabla debe ser considerado potencialmente reactivo independientemente del contenido en el que se halle.

Tabla 4.2. Minerales y rocas potencialmente reactivos - IRAM 1531 (2012)

Reacción	Mineral/ Roca	Contenido máximo (%)
Reacción álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado o microfacturado	5,0
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 μm)	
	Ftanita, chert	3,0
	Calcedonia	
	Tridimita	1,0
	Cristobalita	
	Ópalo	0,5
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0

Cuando el agregado, ya sea fino o grueso, resulte potencialmente reactivo frente a la RAS, su reactividad debe ser comprobada por el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) o por el método de ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2012), en caso contrario, el agregado puede ser utilizado sin restricciones por la RAA. En anexos las normas sugieren una lista de medidas de prevención frente a la reacción álcali-sílice (RAS) tales como: utilizar un cemento RRAA (resistente a la reacción álcali-agregado), limitar el contenido de álcalis del hormigón, incorporar adiciones minerales activas (AMA), etc.

4.2.1.3 Método acelerado de la barra de mortero - IRAM 1674 (1997)

La norma IRAM 1531 (2012), descrita en el punto 5.1.2, establece que cuando los agregados resulten potencialmente reactivos, según el análisis petrográfico, deben ser ensayados por el método acelerado de la barra de mortero. Este ensayo permite determinar el potencial deletéreo de los agregados que se utilizarán en el hormigón en un lapso de 16 días, basado en la norma IRAM 1674 (1997).

Para el mismo se moldean barras de mortero de 25x25x250mm con una relación agua/cemento (a/c) de 0,47 y una relación de 1 parte de cemento por cada 2,25 partes de agregado. Permite evaluar tanto agregados finos como gruesos, reduciendo la granulometría de manera tal que quede conformada la siguiente gradación (en mm) y porcentajes: 4,75-2,36 (10%), 2,36-1,18 (25%), 1,18-0,6 (25%), 0,6-0,3 (25%) y 0,3-0,15 (15%). Las barras se curan en cámara húmeda (23°C) durante 24 horas, luego se desmoldan y sumergen en agua y se lleva el conjunto a una estufa durante 24 horas a 80°C. Pasado este tiempo se efectúa la lectura inicial y se sumergen en una solución 1N de NaOH a 80°C, haciéndose mediciones periódicas durante los próximos 14 días (16 días en total).

Cada uno de los agregados (fino y grueso) debe ser ensayado por separado. Cuando se conozca el conjunto de los agregados y proporciones que han de ser utilizados en obra, el ensayo puede realizarse como mezcla. De acuerdo a la norma, límites de expansión menores que 0,10% a 16 días indican agregados de comportamiento inocuo (no reactivo) mientras que expansiones mayores que 0,20% definen un comportamiento potencialmente deletéreo o reactivo. Valores intermedios, entre 0,10% y 0,20%, incluyen a agregados que pueden comportarse como inocuos o deletéreos en experiencias de campo. En este último caso se recomienda extender los ensayos hasta los 28 días.

Existen referencias bibliográficas que indican que ciertos agregados, a pesar de mostrar un comportamiento deletéreo en servicio o expandir a más de 0,04% a un año con el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2012), no pueden ser detectados

mediante la norma IRAM 1674 (1997), debido a la reducida expansión obtenida con este método. Por tal motivo, cierto tipo de agregados debe ser evaluado mediante el ensayo convencional o acelerado del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2012).

4.2.1.4 Método del prisma de hormigón - IRAM 1700 (2012)

Este ensayo se basa en la determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, destinado a la evaluación de la expansión potencial de los agregados debido a la reacción álcali-agregado (RAA). La dosificación del hormigón para confeccionar los prismas se realiza usando una mezcla de proporciones definidas en relación 60:40 entre agregado grueso y fino. Si se quiere estudiar la reactividad de agregados gruesos, la fracción fina utilizada no debe ser reactiva y viceversa.

Se elaboran 3 prismas de 75x75x275mm ó 75x75x405mm, utilizando una mezcla que contiene un volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón del 70% \pm 0,2% en una relación a/c entre 0,42 y 0,45, un contenido de cemento de 420Kg con un contenido de álcalis equivalente de 0,9% que luego se va incrementando adicionando NaOH al agua de mezclado. Inmediatamente después de terminados, los prismas se almacenan en una cámara húmeda a 23°C y 100% de humedad. A las 24hs se realiza la lectura inicial. Posteriormente siguiendo los lineamientos establecidos en la norma, los recipientes se estacionan en una cámara a $38 \pm 2^\circ\text{C}$ y periódicamente (1, 2, 4, 8, 13, 18 y 39 semanas) se mide el cambio de longitud del prisma hasta la edad de 52 semanas.

La interpretación de los resultados se facilita generalmente mediante el examen visual de los prismas de ensayo, pudiendo observar roturas u otros cambios, tales como la depositación de geles en la superficie del mismo, manchas, combaduras, etc. Es recomendable, además, complementar estos estudios con un examen petrográfico del interior del prisma. Como criterio, el valor límite indicado para la variación en la expansión es de 0,04% a los 12 meses de edad.

4.2.1.5 Método acelerado del prisma de hormigón - IRAM 1700 (2012)

La misma norma IRAM 1700 (2012) en su apartado 5.1.8.3 describe el método acelerado del prisma de hormigón. Este ensayo es similar al descrito anteriormente, consiste básicamente, en acelerar el proceso de reacción a través de un incremento de la temperatura de curado de los prismas, a 60°C y bajo condiciones de elevada humedad. Luego de la lectura inicial, las mediciones se realizan periódicamente a la edad de 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Al terminar con las mediciones también se recomienda realizar una inspección visual del prisma y un análisis petrográfico del hormigón a fin de confirmar la existencia de algún signo de reacción. Aquellos agregados que den expansiones menores al 0,04% a las 13 semanas se consideran no reactivos. Cuando los valores superen dicho límite, el agregado grueso será considerado potencialmente reactivo según este método, sin embargo, su reactividad debe ser comprobada por el ensayo de prisma convencional. En la tabla 4.3 se resumen los límites de expansión para determinar el grado de reactividad alcalina potencial de los agregados, según los ensayos físicos descritos anteriormente.

Tabla 4.3. Determinación del grado de reactividad alcalina del agregado.

Grado de reactividad alcalina del agregado	Expansión del hormigón utilizando la metodología y técnica de la IRAM 1700 ¹⁾ (%)		Expansión del mortero a 16 días en el ensayo IRAM 1674 ²⁾ (%)
	A 52 semanas en el ensayo tradicional (38°C)	A 13 semanas en el método acelerado (60°C)	
No reactivo	Menor que 0,040	Menor que 0,04	Menor que 0,10
Moderadamente reactivo	De 0,040 a 0,120	---	2)
Altamente reactivo	Mayor que 0,120	Mayor que 0,04	Igual o mayor que 0,10

1) En caso de discrepancia entre los resultados obtenidos por los métodos de ensayo de la norma IRAM 1674 y el ensayo utilizando la metodología y técnica de la norma IRAM 1700, ambos realizados sobre el mismo agregado, este último tiene prelación sobre el primero.

2) El método de ensayo según la norma IRAM1674 no es adecuado para distinguir entre agregados de moderada y elevada reactividad. Por esta razón, en ausencia de datos del ensayo utilizando la metodología y técnica de la norma IRAM 1700, los agregados que producen expansiones iguales o mayores a 0,10%, se consideran altamente reactivos.

4.2.1.6 Método químico - IRAM 1650 (1968)

Un ensayo que se usa como complemento para evaluar la potencial reactividad de los agregados frente a la RAS es el método químico (IRAM 1650, 1968). Consiste en determinar la cantidad de sílice que entra en solución al atacar el árido en un medio fuertemente alcalino y la medición de la reducción de la alcalinidad de la solución remanente. Se basa en la reacción que se produce durante 24 horas a 80°C de temperatura entre una solución de NaOH 1 N y un árido que ha sido molido y tamizado hasta pasar tamiz 300µm y quedar retenido en el tamiz 150µm.

Para ello se pesan tres porciones representativas de las muestras, de 25 gramos cada una, se colocan en recipientes resistentes a la corrosión y de cierre hermético y se agregan 25ml de una solución de NaOH 1N. Se prepara un cuarto recipiente donde se colocan 25ml de la solución de NaOH para utilizarla como ensayo en blanco. Se cierran y se colocan en un baño de agua a 80 °C durante 24 horas. Se filtra la solución, se toma una alícuota de 10ml y se la lleva a volumen en un frasco volumétrico de 200ml. Esta solución se utilizará en la determinación de la sílice disuelta y la reducción en alcalinidad.

La determinación de la primera por el método gravimétrico se realiza transfiriendo 100 ml de la solución diluida a una cápsula de evaporación, se agregan 5ml a 10ml de ClH y una cantidad igual de agua. Se cubre la cápsula y se mantiene a temperatura constante de 90°C. Se diluye la solución con 10ml a 20ml de agua caliente y se filtra. Se transfiere el papel de filtro a un crisol de platino tarado y se quema. La cantidad de sílice se determina por diferencia entre el peso y el obtenido previamente. El ensayo en blanco se efectúa siguiendo el mismo procedimiento.

La concentración de sílice de la solución de NaOH filtrada se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C1 = (G1 - G2) \times 1/5 \times 1/0,060 \times 1000 = (G1 - G2) \times 3333.$$

Donde:

C1 = Concentración de sílice en el filtrado original en milimoles por litro.

G1 = Sílice hallada en 100 ml de solución diluida en gramos.

G2 = Sílice hallada en el ensayo en blanco en gramos

Para la determinación de la reducción de la alcalinidad se transfieren 20ml de la solución diluida a un erlenmeyer de 125ml, se añaden 2 o 3 gotas de solución alcohólica de fenoftaleina y se valora con una solución 0,05 N de ClH hasta decoloración. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R = 20/V1 \times (V3 - V2) \times N \times 1000$$

Donde:

R = Reducción en alcalinidad, expresada en hidróxido de sodio, en milimoles por litro de filtrado.

V1 = Volumen de solución en mililitros.

V2 = Volumen de ácido clorhídrico utilizado en la valoración de la muestra, en mililitros.

V3 = Volumen de ácido clorhídrico utilizado en la valoración del blanco, en mililitros

N = Normalidad del ácido clorhídrico utilizado en la valoración.

Los valores de R y C1 se proyectan en un diagrama, calificando al árido de acuerdo a su reactividad alcalina potencial según se ubique en el área de agregados reactivos o inocuos delimitada por la curva teórica. El método se utiliza principalmente para realizar evaluaciones rápidas, ya que permite obtener resultados en pocos días. Se debe tener precaución al interpretar los resultados ya que, algunos agregados presentan baja expansión aun cuando tienen alto contenido de sílice disuelta y viceversa. La reducción de la alcalinidad es muy variable y en agregados que contienen carbonatos dan resultados erróneos. Sin embargo la sílice disuelta es un buen indicador que se correlaciona con la expansión medida en las barras de mortero (Marfil *et al.*, 1995), por ello en este trabajo de Tesis sólo se determinó la sílice disuelta y con los resultados obtenidos se realizaron gráficos para determinar la correlación con los ensayos físicos (prismas de hormigón y barras de mortero).

4.2.2 Otros métodos empleados

4.2.2.1 Estereomicroscopía

Los estudios a nivel macroscópico se realizaron utilizando un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT, del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur. Esta técnica se empleó sobre muestras de roca extraídas de los frentes de cantera y en el material triturado 6-20mm para evaluar sus características petrográficas.

La técnica también se utilizó para identificar y separar productos de neoformación observados en barras de mortero y prismas de hormigón luego de cumplido el tiempo de ensayo y para evaluar los hormigones de las estructuras analizadas. Se separaron materiales observados en cavidades de aire accidental, interior de microfisuras y en las zonas de contacto agregado-mortero para su posterior análisis mediante difracción de rayos X o microscopía electrónica de barrido.

También se utilizó para la purificación y separación de las arcillas y zeolitas observadas en los basaltos vesiculares, que posteriormente fueron analizadas mediante microscopía óptica con luz incidente y transmitida; microscopía electrónica de barrido y microanálisis con sonda de electrones.

4.2.2.2 Microscopía de polarización

Los estudios sobre secciones delgadas se realizaron utilizando un microscopio óptico del Dpto. de Geología de la UNS, Leica DM750P, equipado con cámara y sistema de captura de imágenes para la toma de fotomicrografías.

La técnica se utilizó para describir de manera detallada la textura y mineralogía de las rocas y para el análisis petrográfico del triturado 6mm-20mm según lo establecido en la norma IRAM 1649 (2008). También se confeccionaron secciones delgadas para el estudio de hormigones de obra realizadas con las rocas basálticas estudiadas, de los

prismas de hormigón ensayados según IRAM 1700 (2012) y de las barras de mortero realizadas según el método acelerado IRAM 1674 (1997).

La determinación del contenido de vidrio y arcillas se realizó sobre muestras de material triturado 6mm-20mm, se tomó una porción y se impregnó en resina tipo epoxi de índice de refracción (n)~1,54 y se confeccionaron secciones delgadas. Bajo microscopio óptico se cuantificó el porcentaje de vidrio y arcilla dentro de cada partícula (se informa como % de vidrio y % de arcillas en la muestra). Esta operación se repitió 5 veces (en 5 campos) con un objetivo x5 (magnificación 50) y otras 5 veces con una magnificación x10. Se promediaron las determinaciones sobre los 10 campos.

4.2.2.3 Microscopía UV

Mediante un microscopio óptico Leica DM4500 P LED con luz UV incidente (epifluorescencia) con un aumento x100 (ocular x10 y objetivo x10) se estudiaron secciones delgadas impregnadas con resina fluorescente correspondientes a barras de mortero y prismas de hormigón post ensayo para evaluar el grado de fisuramiento y su correlación con los valores de expansión obtenidos según las normas IRAM respectivas. Se realizó un barrido continuo del área ocupada por la sección delgada (25mm x 35mm) tomando un promedio de 50 imágenes por muestra.

Para discriminar las fisuras en cada imagen, se realizó un mapeo en forma manual, con el programa Corel Draw X6. Se adaptó el grosor de cada línea al ancho de cada fisura en todas las imágenes y en el caso de aquellas de morfología irregular, se mapearon con su forma construyendo superficies rellenas. Luego se exportaron los mapas de fisuras a imágenes binarias y se calculó el área fisurada de cada mapa y la densidad de fisuras mediante el software ImageJ (Rasband, 2011). La densidad de fisuras se calculó sumando la longitud de todas las fisuras observadas en un campo del microscopio dividido el área de dicho campo (mm/mm^2) y luego se obtuvo un promedio sobre el total de las imágenes. Además se trabajó con el área fisurada, que considera no solo la longitud sino el ancho de las fisuras y se expresa como el porcentaje del área del campo estudiado ocupada por el área fisurada (%).

4.2.2.4 Difractometría de rayos X (DRX)

Para identificar los productos de alteración de las rocas y los materiales de neoformación en hormigones de obra, prismas y barras de mortero, se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III-C con radiación de Cu K α y monocromador de grafito, con 35Kv y 15mA. Se trabajó de 3 a 60° (2 θ) con escaneo por pasos, utilizando un paso de 0,04 y un segundo de tiempo de lectura.

Para concentrar las arcillas presentes en el basalto, se utilizó el método de cilindro bureta. Para ello se colocó una porción de muestra molida en una probeta con agua destilada, se dejó decantar durante 2 horas y se extrajo una porción de la suspensión y se dispersó sobre un portaobjetos (preparado orientado de la fracción <2 μ m). En este caso el análisis se realizó de 3 a 40° (2 θ) con un paso de conteo de 0,02° θ y 8 segundos de tiempo de conteo. Se analizó en estado natural, glicolada (tratada en una atmósfera saturada en etilenglicol a 60°C durante 12 horas) y calcinada (a 500°C durante 2 horas) con el objetivo de ver la variación en la estructura de las mismas.

4.2.2.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)

Se realizaron estudios morfológicos y composicionales mediante MEB-EDS. La técnica se aplicó sobre trozos de roca de los afloramientos y en testigos de hormigón extraídos de obras realizadas con los agregados basálticos, para analizar las zonas de interfase agregado-mortero y los productos de reacción.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 35 CP equipado con una sonda EDAX, DX 4, de ventana ultradelgada, con un rango de análisis elemental desde Z = 5 (B) hasta Z = 92 (U), para el análisis químico cualitativo de microáreas sobre muestras metalizadas con oro o carbono dependiendo de la composición de las especies de interés, perteneciente al CCT-CONICET de la ciudad de Bahía Blanca.

En el laboratorio LAMARX (Laboratorio de microscopía electrónica y análisis de rayos X) de la Universidad Nacional de Córdoba, se obtuvieron imágenes de electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) mediante un microscopio FE-SEM Sigma,

utilizando trozos de material seleccionado bajo lupa y secciones delgadas pulidas recubiertas con carbono (tamaño abrasivo hasta 1 μm) respectivamente.

4.2.2.6 Microanálisis con sonda de electrones

Se utilizó una microsonda JEOL JXA 8230 con tres espectrómetros de dispersión de longitud de onda (WDS) y uno EDS integrado, perteneciente al laboratorio LAMARX de la Universidad Nacional de Córdoba. Las condiciones analíticas utilizadas fueron 15kV, 10nA, tiempo de conteo de 10s pico+fondo. Se aplicó sobre secciones delgadas pulidas recubiertas de carbono (tamaño abrasivo de hasta 1 μm) para el análisis de la química mineral de los materiales arcillosos presentes en cavidades. También se obtuvieron mapas composicionales (Mg, Ca, Si, Al, Na y K) a 15kV, y alto vacío.

4.2.2.7 Análisis químicos de roca total

Se realizaron análisis químicos de roca total de elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, por ICP-MS (inductively coupled plasma-mass spectrometry) en Bureau Veritas, Canadá. Los datos se procesaron utilizando el software GCD kit de Janoušek *et al.* (2006).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS. Petrografía y Geoquímica

5.1 Petrografía

En este apartado se realiza un análisis de detalle sobre cada uno de los niveles de explotación de las 5 canteras relevadas para evaluar su variación mineralógica y textural en todo el frente. La descripción se realiza desde la base hasta el techo de las canteras. Se utilizaron las abreviaturas minerales propuestas por Siivola y Schmid (2007).

5.1.1 Cantera "L.A"

La cantera en general presenta poca variación entre sus niveles. En el inferior, muestras L.A1, L.A2 y L.A3, la textura de las rocas es intersertal a intergranular con plagioclasas de tamaño que varía entre 250 μ m y 400 μ m. El mineral máfico es augita y augita titanífera, que se aloja entre las tablillas de plagioclasa. Su tamaño no supera los 200 μ m, siendo menores en la muestra L.A2. Son frecuentes en todos los casos, los autolito de textura granular y sectores de mayor desarrollo cristalino, con escasa alteración y evidencias de asimilación periférica por parte de la pasta (Figura 5.1a y b). Algunos piroxenos aislados, de mayor desarrollo que los de la pasta pero menor que los que conforman los autolito, se encuentran cloritizados y fracturados dando lugar a la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro (Figura 5.1c). Son abundantes los minerales opacos y el apatito como mineral accesorio. La oxidación en las rocas es variable. L.A1 presenta zonas de oxidación muy marcadas tipo venillas mientras que en L.A2 y LA.3 la oxidación es tipo moteada. En los espacios intercristalinos se reconoce vidrio relíctico (Figura 5.1d), cuyo contenido no varía significativamente entre las muestras de este nivel. En este frente se reconoció una zona de alteración aislada, caracterizada por un basalto vesicular, oscuro debido al elevado contenido de óxidos de hierro, que tiñó la pasta de la roca. En las vesículas de mayor tamaño se reconoce calcita y material clástico como relleno. Los espacios de menor desarrollo se

caracterizan por la presencia de arcillas en las paredes de la cavidad, de color verde (Figuras 5.1e y f).

El segundo nivel (L.A4, L.A5 y L.A6) no presenta gran variación granulométrica, en comparación con el anterior. El tamaño de las plagioclasas oscila entre 250 μ m y 500 μ m, los mafitos acompañan la granulometría al igual que en el resto de las muestras analizadas y son abundantes los minerales opacos. Los autolito se presentan en todas las muestras, alcanzan los 1,5mm - 3mm y se encuentran inalterados (Figura 5.1g y h). Algunos piroxenos aislados están totalmente alterados. En los interespacios dejados por la plagioclasa es abundante el vidrio relíctico (Figura 5.1i) y, en algunos sectores, las arcillas de tipo esmectitas con buen desarrollo cristalino (Figura 5.1j). El mineral accesorio es apatito.

El nivel superior mantiene las características de las rocas descritas, con mayor contenido de autolito, en ocasiones monominerales y de mayor desarrollo cristalino. Se puede observar en la Figura 5.1k la generación de más de un tipo de piroxeno. Uno acompaña a la granulometría de la pasta, otro de tamaño intermedio que presenta, en todos los niveles descritos, fuerte cloritización. También se reconocen individuos aislados de mayor desarrollo cristalino sin alteración, conservando sus características ópticas originales (Figura 5.1l). El contenido de vidrio y arcilla producto de la desvitrificación, presenta moderada variación, siendo más abundante la presencia de esmectitas en las muestras del nivel medio. El contenido de vidrio (~5%) es mayor que el de arcillas (<3%).

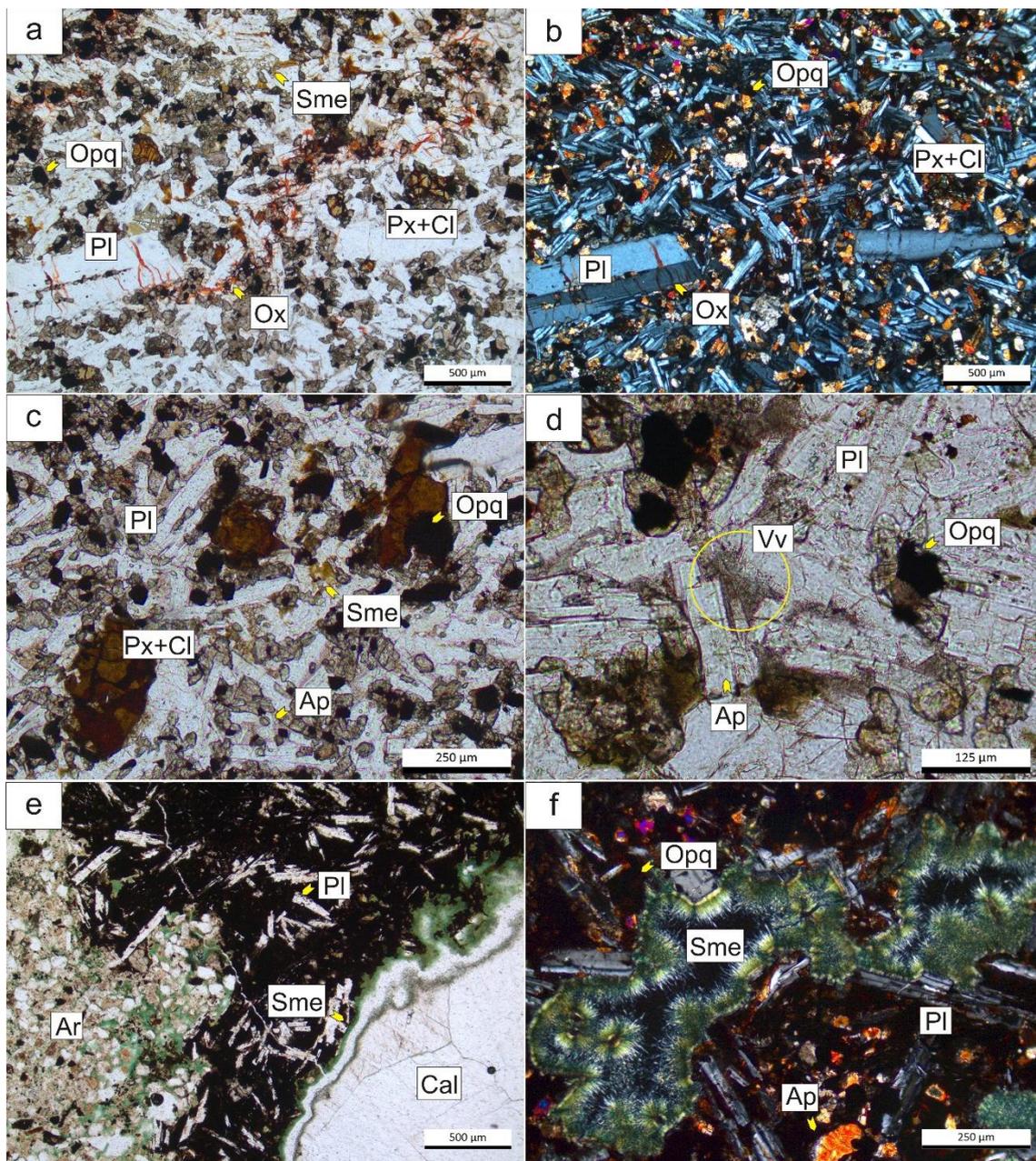


Figura 5.1 a y b. Textura intersertal a intergranular, plagioclasas de gran desarrollo cristalino, con escasa alteración y evidencias de asimilación periférica. c. Piroxenos cloritizados y fracturados dando lugar a la precipitación de óxidos de hierro. Son abundantes los minerales opacos y el apatito. d. Vidrio relíctico en los espacios intercristalinos (circulo amarillo). e. Basalto vesicular con alto contenido de óxidos de hierro. Se reconoce calcita y esmectitas en las paredes de la cavidad. f. Sector similar a “e” con abundantes arcillas.

a, c, d y e: Luz paralela. b y f: Nícoles cruzados.

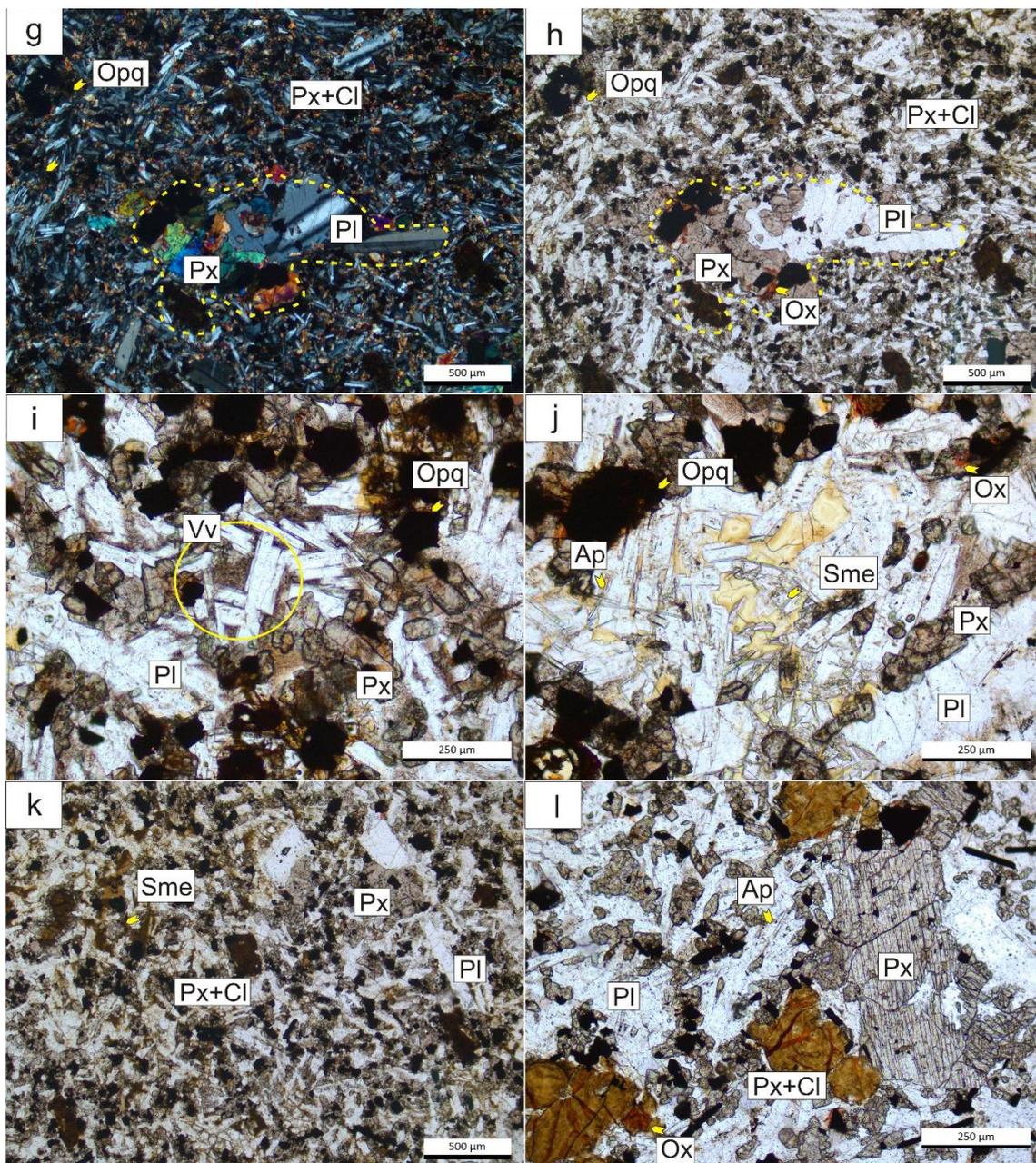


Figura 5.1 g y h. Autolito de gran desarrollo cristalino inalterados (línea punteada). i. Vidrio relíctico en los interespacios dejados por la plagioclasa (circulo amarillo). j. Desarrollo de arcillas de tipo esmectitas. k y l. Generación de más de un tipo de piroxeno. Se reconocen algunos con fuerte cloritización e individuos aislados, de mayor desarrollo cristalino sin alteración. g: Nícoles cruzados. h, i, j k y l: Luz paralela.

5.1.2 Cantera “L.M”

Se trata de una cantera muy homogénea con características similares en todos sus niveles. En el inferior se tomaron tres muestras desde la base hasta el techo, denominadas L.M1, L.M2 y L.M3. Son basaltos de textura intersertal en sectores intergranular. El tamaño de grano va disminuyendo hacia el techo, 250 μ m - 500 μ m en L.M1 a 150 μ m - 300 μ m en L.M3, y aumenta el contenido de minerales opacos. En general la plagioclasa se encuentra fresca, al igual que los minerales máficos (augita y augita titanífera) que se alojan en los interespacios dejados por el feldespato. Es muy abundante el apatito como mineral accesorio (Figura 5.2a y b). Todas las muestras presentan autolito de composición similar a la roca, con mayor desarrollo cristalino y textura microgranular (Figura 5.2c y d). Están compuestos por plagioclasa y augita titanífera, con escasa alteración y evidencias de asimilación por parte de la pasta. Se reconocen, en los tres casos, individuos aislados de piroxenos de mayor desarrollo cristalino (300 μ m - 550 μ m), totalmente cloritizados (Figura 5.2e). Esta característica se observó en todos los niveles analizados. El contenido de vidrio y arcilla (producto de la desvitrificación), no varía significativamente en estas muestras.

El segundo nivel de cantera (L.M4, L.M5 y L.M6) presenta características muy similares. Aumenta levemente el tamaño de grano en las plagioclasas (entre 300 μ m y 600 μ m) y en los interespacios se alojan pequeños cristales de augita/augita titanífera. Se reconocen piroxenos de mayor desarrollo cristalino, cloritizados y fracturados, y espacios donde precipitan óxidos e hidróxidos de hierro. Se observaron venillas en ocasiones vacías y/o rellenas de minerales arcillosos que afectan la roca, con precipitación de óxidos de hierro en los bordes (Figura 5.2 f). En todas las muestras se observaron autolito de textura granular, sin alteración. Son abundantes los minerales opacos y el apatito. Se reconoció en este nivel, sobre uno de los frentes de la cantera, una zona de alteración posiblemente relacionada a una falla con rumbo N75°E, que afecta al basalto dando lugar a la formación de arcillas rojas y amarillas dentro de su masa. La Figura 5.2g y h muestra abundantes arcillas de color claro alterando los minerales máficos y en forma de venillas. Los cristales de plagioclasa se encuentran

fracturados donde se aloja sericita como producto de alteración. Los piroxenos de mayor desarrollo están fuertemente cloritizados, asociados a óxidos e hidróxidos de hierro precipitados en fracturas. La Figura 5.2i y j, muestra las arcillas de color pardo oscuro, posiblemente debido al mayor contenido de óxidos de hierro. En el sector también se reconocieron venillas de calcita, de espesor variable (Figura 5.2 k). Las más anchas incluyen clastos del basalto que las aloja (Figura 5.2 l).

El nivel superior de la cantera (L.M7, L.M8 y L.M9) conserva las características generales de todo el afloramiento. El tamaño de grano no varía respecto al nivel medio, las plagioclasas se encuentran frescas y se reconoce augita/augita titanífera como mineral máfico. Los piroxenos de mayor desarrollo se encuentran cloritizados, con más de un tipo de clorita y fracturados con precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro. Los autolito no presentan alteración. En las muestras L.M8 y L.M9 se reconocieron zonas de fisuras, las cuales en ocasiones se encuentran vacías o rellenas con material arcilloso. El contenido de vidrio y de arcillas esmectíticas producto de la desvitrificación del mismo, no varía significativamente entre los niveles analizados y se encuentran en proporciones similares (entre 2% y 3% para ambos casos).

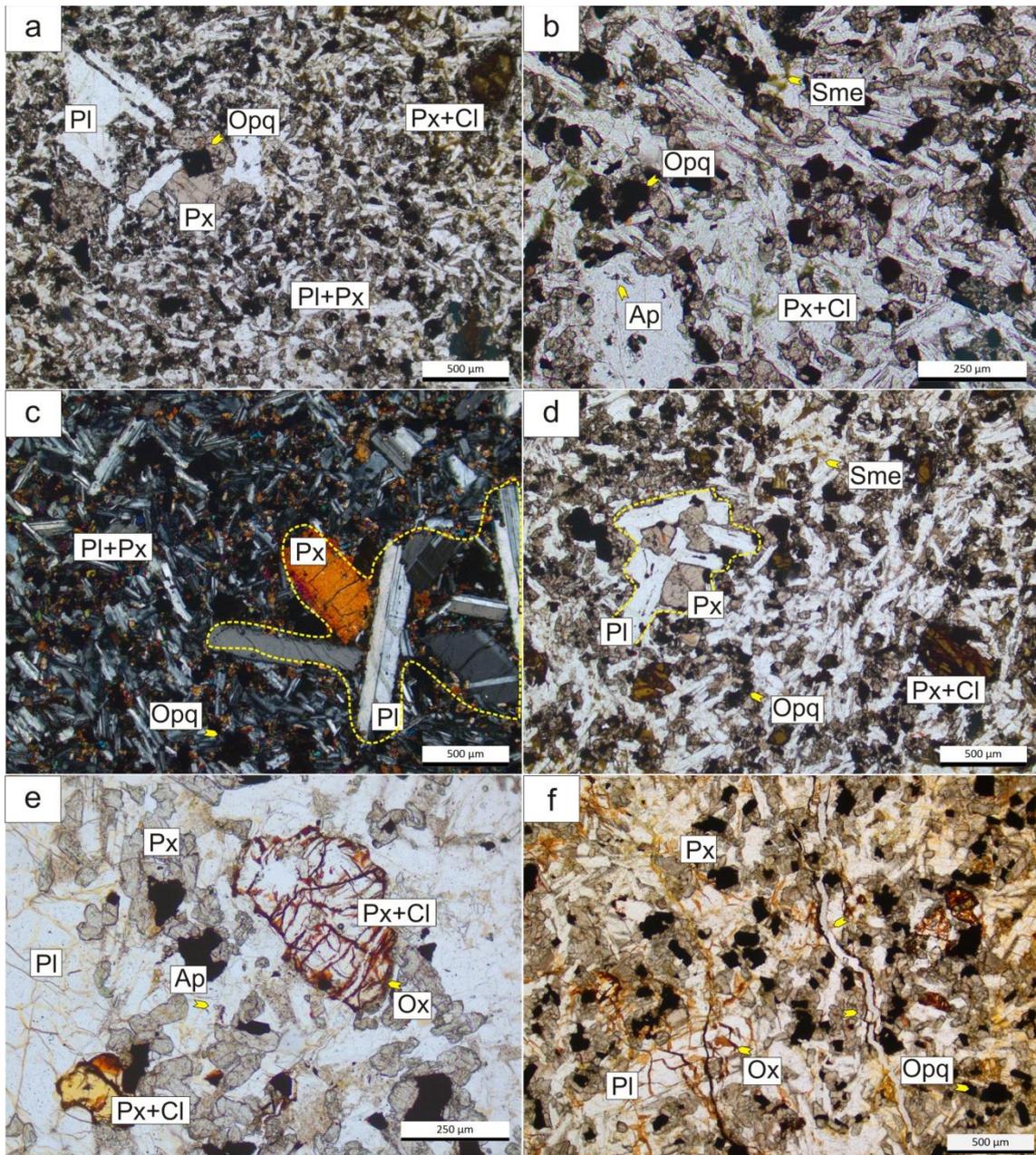


Figura 5.2 L.M1, L.M2 y L.M3. a. Cristales de plagioclasa y minerales máficos en los interespacios dejados por el feldespato sin evidencias de alteración. b. Es abundante el apatito. c. y d. Autolito de composición similar a la roca, con mayor desarrollo cristalino y textura microgranular (línea punteada). e. Individuos aislados de piroxenos de mayor desarrollo cristalino cloritizados y fracturados, con precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro. f. venillas vacías y/o rellenas de minerales arcillosos con óxidos de hierro en la periferia. a, b, d, e y f: Luz paralela . c: Nícoles cruzados.

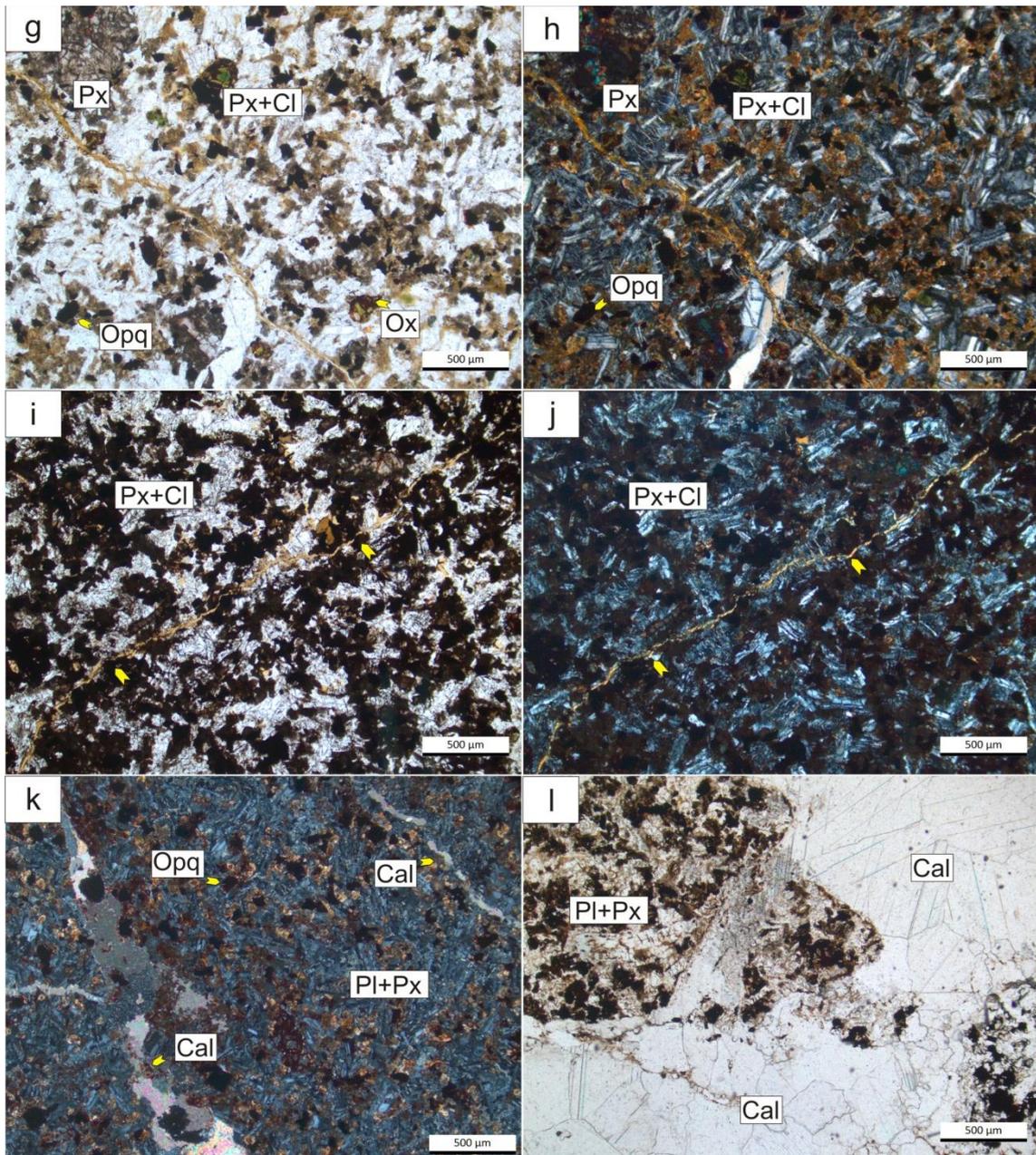


Figura 5.2. g. y h. Arcillas de color claro alterando los minerales máficos y en forma de venillas.

i y j. Arcillas de color pardo oscuro, posiblemente debido al mayor contenido de óxidos de hierro. k. Venillas de calcita, de espesor variable. l. Las más anchas incluyen clastos del basalto que las aloja. g, i y l: Luz paralela. h, j y k: Nícoles cruzados.

5.1.3 Cantera “L.D”

A diferencia de las canteras hasta ahora descritas, ésta tiene características particulares. En el nivel inferior, muestras L.D1, L.D2 y L.D3, la plagioclasa presenta tamaño variable (aunque no supera los 300 μm), marcada corrosión en sus bordes y moderada sericitización. El mafito, de menor tamaño, es augita/augita titanífera y todos los individuos se encuentran cloritizados adquiriendo una tonalidad verdosa en todos los niveles. Se reconocen algunos autolito de mucho mayor desarrollo cristalino que el resto de la roca, los cuales también se presentan alterados, con sericitización en las plagioclasas (Figura 5.3a y b). En esta cantera es común la presencia de sanidina fresca y cuarzo microcristalino, ocupando los espacios intercristalinos (Figura 5.3c y d). Todas las muestras se caracterizan por presentar oxidación en motas asociada a la desferrización de los minerales opacos de mayor desarrollo cristalino. El tamaño de estos disminuye desde la base (L.D1) hasta el techo (L.D3). En ocasiones la oxidación se encuentra asociada a zonas de fisura (Figura 5.3e) donde el basalto se encuentra fuertemente teñido con óxidos e hidróxidos de hierro. En otros sectores se observaron fisuras, vacías o rellenas con calcita y en algunos casos con precipitación de óxidos de hierro en su interior (Figura 5.3 f).

En las muestras del nivel medio, L.D4 y L.D5, no es tan marcada la oxidación y los mafitos y las plagioclasas son similares a las del nivel anterior. Estas muestras se caracterizan por el intercrecimiento de cuarzo y sanidina dando lugar a la formación de texturas poiquilíticas y micrográficas (Figura 5.3g y h). En la Figura 5.3i se observa el cambio al nivel superior (L.D6, L.D7 y L.D8), donde se reconoce un aumento en el tamaño de grano de la roca, aunque en general conserva las características y texturas ya mencionadas. El tamaño de la plagioclasa oscila entre 450 μm y 600 μm y los minerales opacos acompañan a la granulometría del feldespato y se encuentran localmente desferrizados. Los interespacios cristalinos también están ocupados por sanidina e intercrecimiento de ésta con cuarzo microgranular (Figura 5.3j). Es abundante la sericita (Figura 5.3k y l). El contenido de vidrio y arcillas esmectíticas es bajo (<1,5%) debido a la recristalización de minerales secundarios.

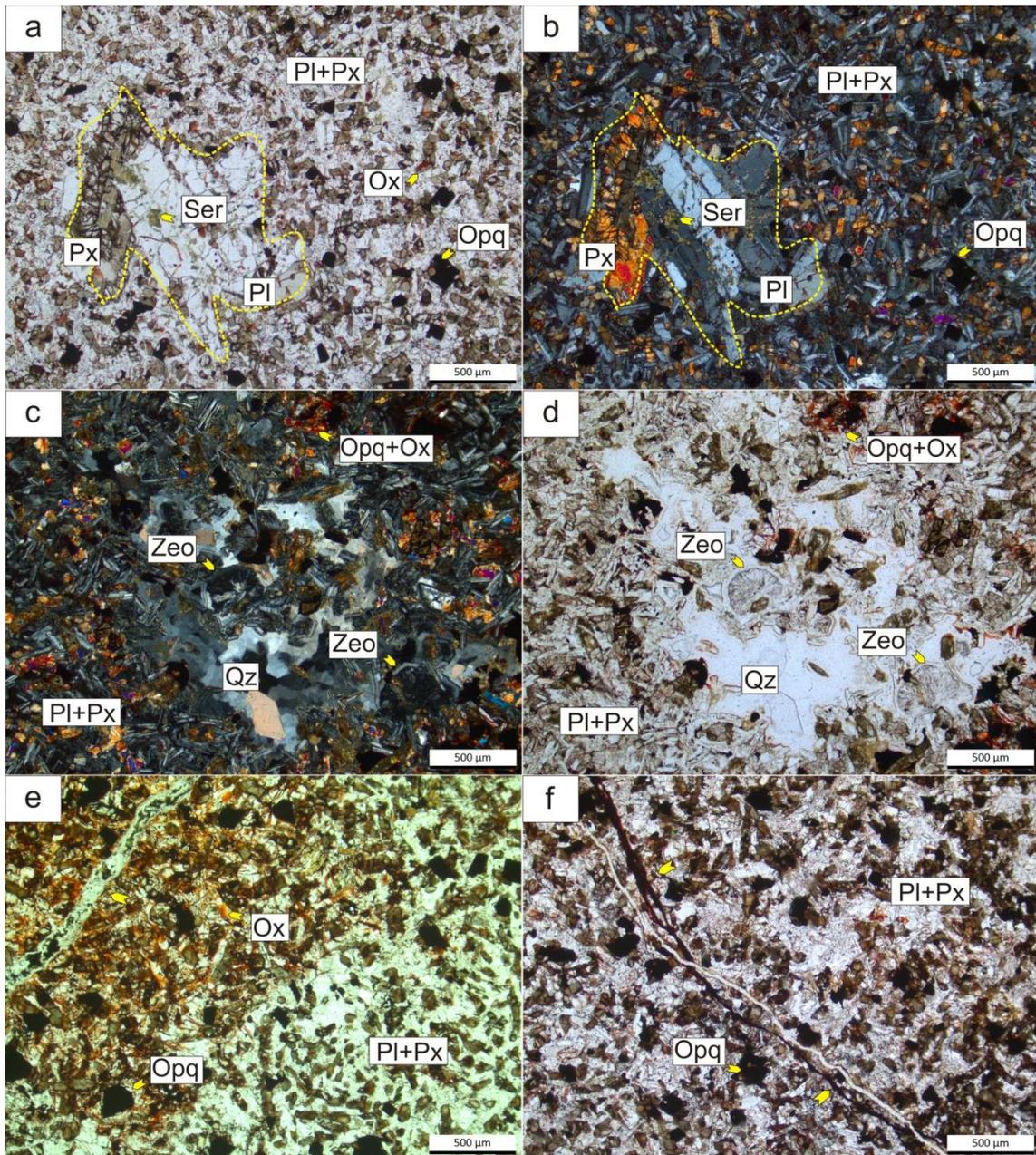


Figura 5.3. a y b. Autolito mayor desarrollo cristalino que el resto de la roca, alterados, con sericitización en las plagioclasas (línea puntada). c y d. Cuarzo microcristalino, ocupando los espacios intercristalinos. d. Oxidación asociada a zonas de fisura. e. Fisuras, vacías o rellenas con calcita y óxidos de hierro. a,d,e y f: Luz paralela. b y c: Nícoles cruzados.

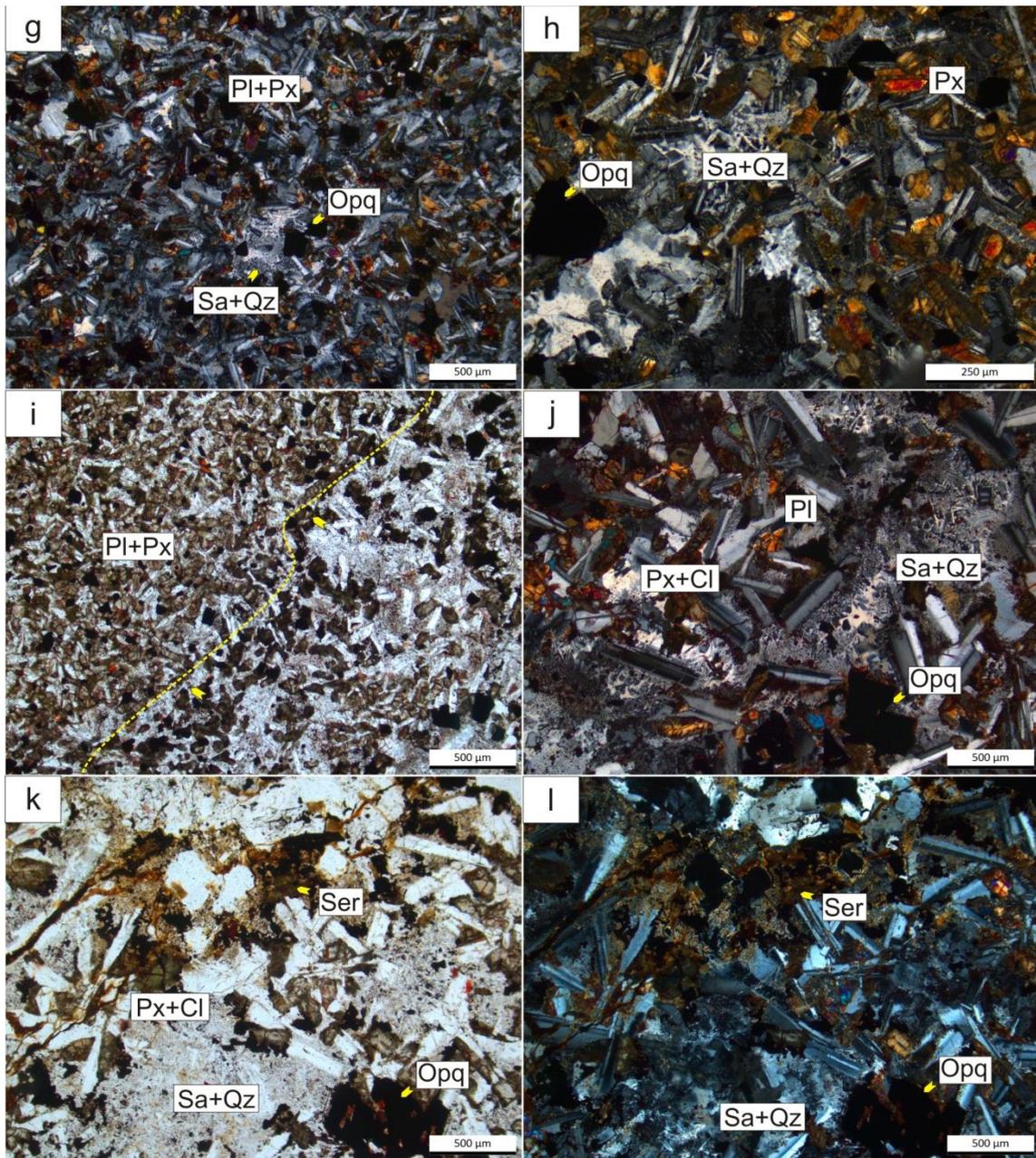


Figura 5.3 g y h. Intercrecimiento de cuarzo y sanidina dando lugar a texturas poiquilíticas y micrográficas. i. Variación en el tamaño de grano de la roca. j. Interespacios cristalinos ocupados por sanidina e intercrecimiento de ésta con cuarzo microgranular. k y l Abundante desarrollo de sericita. i y k: Luz paralela. g, h, j y l: Nícoles cruzados.

5.1.4 Cantera “Y”

Esta cantera presenta gran heterogeneidad en su frente. El nivel inferior Y1 y Y2, comienza con un basalto vesicular fuertemente alterado. Las plagioclasas están sericitizadas y presentan bordes corroídos, el mafito se encuentra cloritizado en ocasiones perdiendo sus características ópticas originales (Figura 5.4a). Las vesículas están rellenas parcial o totalmente por arcillas (Figura 5.4b). El nivel Y2 que se encuentra inmediatamente por encima, es un basalto de textura intersertal, en sectores intergranular. La plagioclasa no presenta alteración, sin embargo está fuertemente corroída por parte de la matriz y fracturada. El tamaño de las tablillas oscila entre 100 μ m y 1200 μ m. El mafito (de dimensiones menores al feldespato) es augita/augita titanífera alterada diferencialmente, comúnmente desferrizada y cloritizada. Los minerales opacos, de mayor tamaño, están localmente desferrizados (Figura 5.4c y d).

En el basalto del nivel medio (Y4, Y5 y Y6) no varían sus características mineralógicas ni texturales respecto al anterior, en sectores se reconoce sanidina secundaria en ocasiones asociada a cuarzo microgranular, relleno los interespacios (Figura 5.4e y f). Sin embargo, en uno de los frentes, se destaca la presencia de un basalto de color negro que corta al descrito anteriormente, en el que se reconoce escasa cantidad de minerales (feldespatos y mafitos) inmersos en una pasta rica en minerales opacos. En la Figura 5.4g y h, se puede observar el contacto entre ambos, con una intercalación de arenisca y fisuras de rellenas con material arcilloso. En el sector se reconocen venillas, de espesores variables, rellenas con calcedonia, arcillas y/o areniscas con cemento silíceo.

En el nivel superior las muestras, Y7 y Y8, presentan un elevado grado de meteorización, con abundante contenido de arcilla y zeolitas (Figura 5.4i). Las tablillas de plagioclasa se encuentran fuertemente corroídas y fracturadas, asociadas a sericita. El mineral máfico al igual que en el resto de los niveles está totalmente cloritizado. El nivel culmina (muestra Y9) con un banco de arenisca cuarzosa con cemento silíceo,

(Figura 5.4j). En ocasiones, se reconoce venillas en las muestras de los niveles inferiores (Figura 5.4 k).

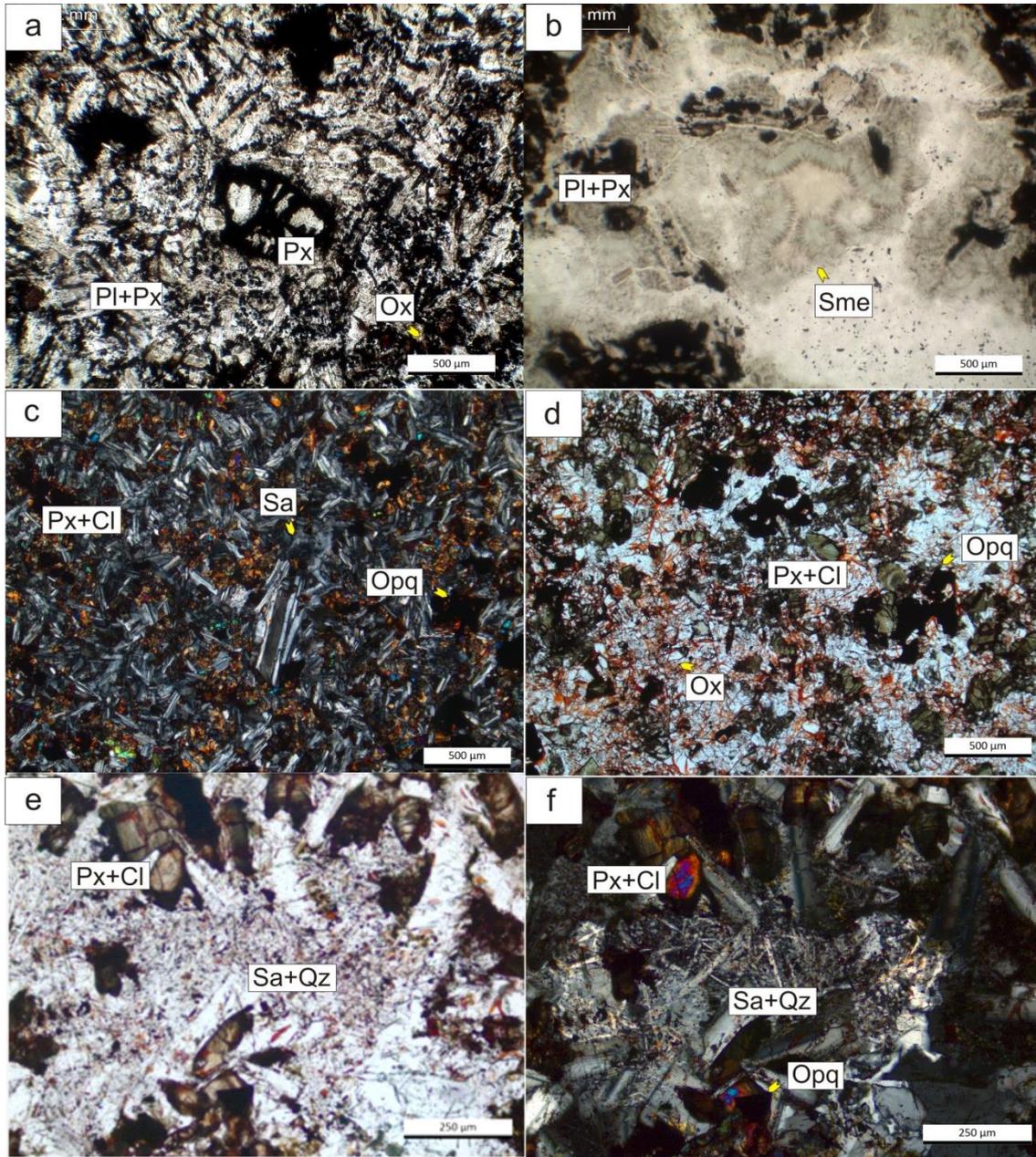


Figura 5.4. a. Plagioclasa sericitizada con sus bordes corroídos, mafito cloritizado. b. Vesículas rellenas parcial o totalmente por arcillas. c y d. Nivel Y2. Textura intersertal, en sectores intergranular. Plagioclasa corroída y fracturada, augita/augita titanífera desferrizada y cloritizada y minerales opacos localmente desferrizados. e y f. Nivel medio (Y4, Y5 y Y6), sectores con sanidina en ocasiones asociada a cuarzo microgranular, relleno de los interespacios. a, b, d y e : Luz paralela. c y f: Nícoles cruzados.

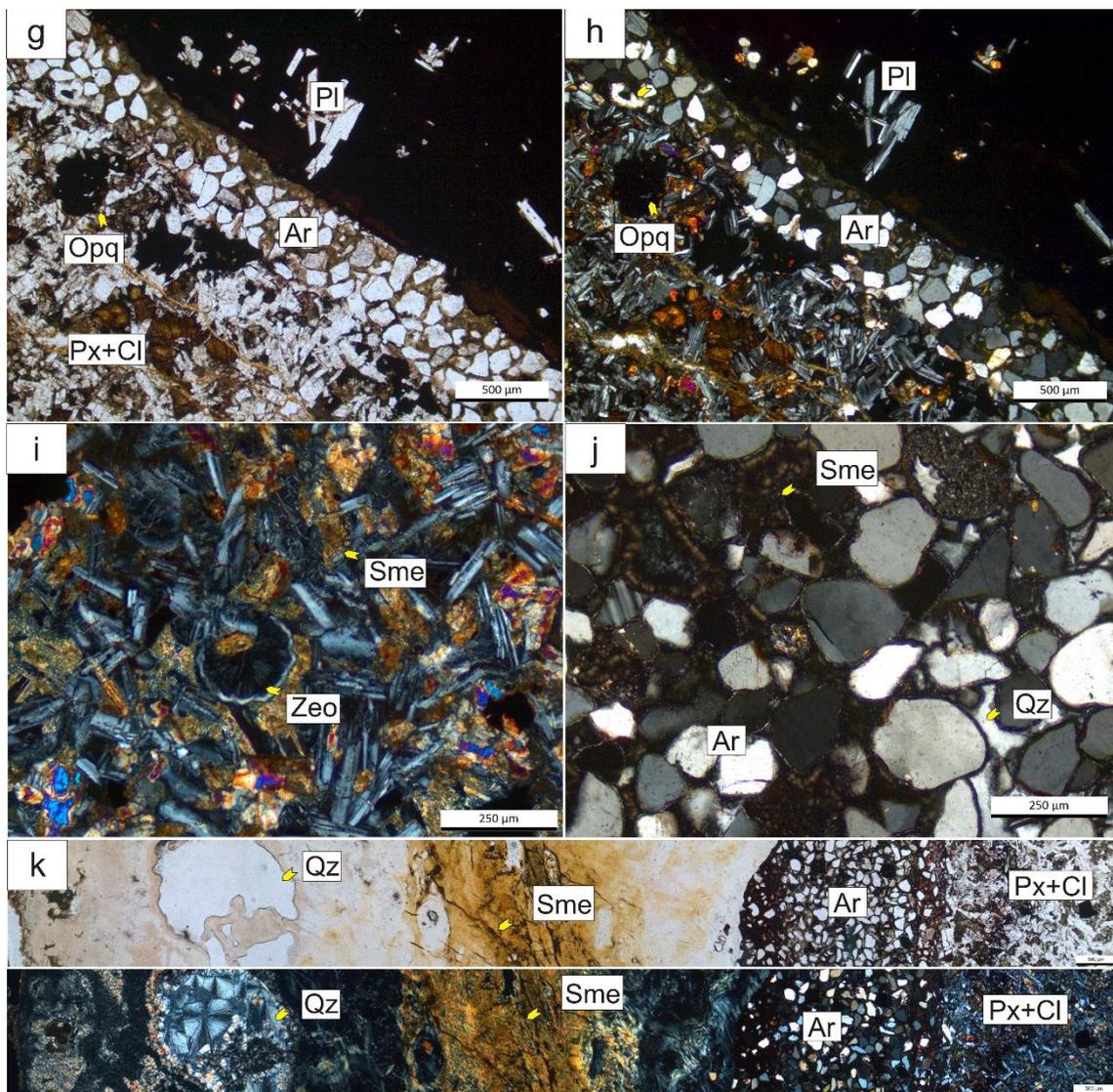


Figura 5.4. g y h. Contacto entre el basalto descrito y uno color negro con óxidos de hierro en la pasta intercalados con una arenisca. i y j. Nivel superior (Y7 y Y8), abundante contenido de arcillas y zeolitas. J. Arenisca cuarzosa con cemento silíceo. K. Venillas de la arenisca dentro del basalto de los niveles inferiores. g: Luz paralela. h, i y j: Nícoles cruzados.

5.1.5 Cantera "P.Y"

Esta cantera es la de mayor tamaño de grano respecto a las descritas anteriormente y presenta gran heterogeneidad en su frente. En el nivel inferior se tomaron dos muestras, denominadas P.Y1 y P.Y2, ambas presentan plagioclasa con tamaños que varían entre 0,5mm y 1,5mm, con bordes corroídos y fisuradas. El mafito es augita titanífera, con menor desarrollo cristalino ($\approx 500\mu\text{m}$), levemente alterado. Los minerales opacos acompañan la granulometría de los mafitos y están asociados a óxidos e hidróxidos de hierro. La alteración de la roca es moderada. En los interespacios cristalinos se reconocen sectores con vidrio relíctico asociado en ocasiones a arcillas esmectíticas producto de la desvitrificación, cloritas y sílice criptocristalina. Es abundante el apatito (Figura 5.5a y b). Entre este nivel y las muestras del nivel medio se reconoció un basalto vesicular oscuro debido al alto contenido de óxidos de hierro, que tiñó la pasta de la roca. Las vesículas y fisuras están rellenas de calcita (Figura 5.5c).

En el nivel medio, P.Y2 y P.Y3, aumenta levemente el tamaño de grano pero se conservan las características mineralógicas y texturales de las muestras anteriores (Figura 5.5d y e). La alteración de la mesostasis es levemente más marcada. En los espacios intercristalinos, se reconocieron arcillas, junto a cuarzo microgranular y zeolitas (Figura 5.5f). En estos sectores también es abundante el apatito de forma acicular. Entre ambos niveles se reconoció un basalto vesicular oscuro, con venillas rellenas de calcita y calcedonia (Figura 5.5g), las vesículas en ocasiones se encuentran vacías o rellenas con minerales arcillosos (Figura 5.5h). En el mismo sector se identificaron intercalaciones de una arenisca cuarzosa con cemento silíceo en contacto con el basalto vesicular (Figura 5.5i y j).

En el nivel superior, la muestra P.Y5, presenta mayor grado de meteorización respecto a P.Y6, con abundante contenido de arcilla producto de la alteración de la mesostasis (Figura 5.5k). En ambas muestras las tablillas de plagioclasa se encuentran fracturadas, sin marcada alteración al igual que el mineral máfico (Figura 5.5l).

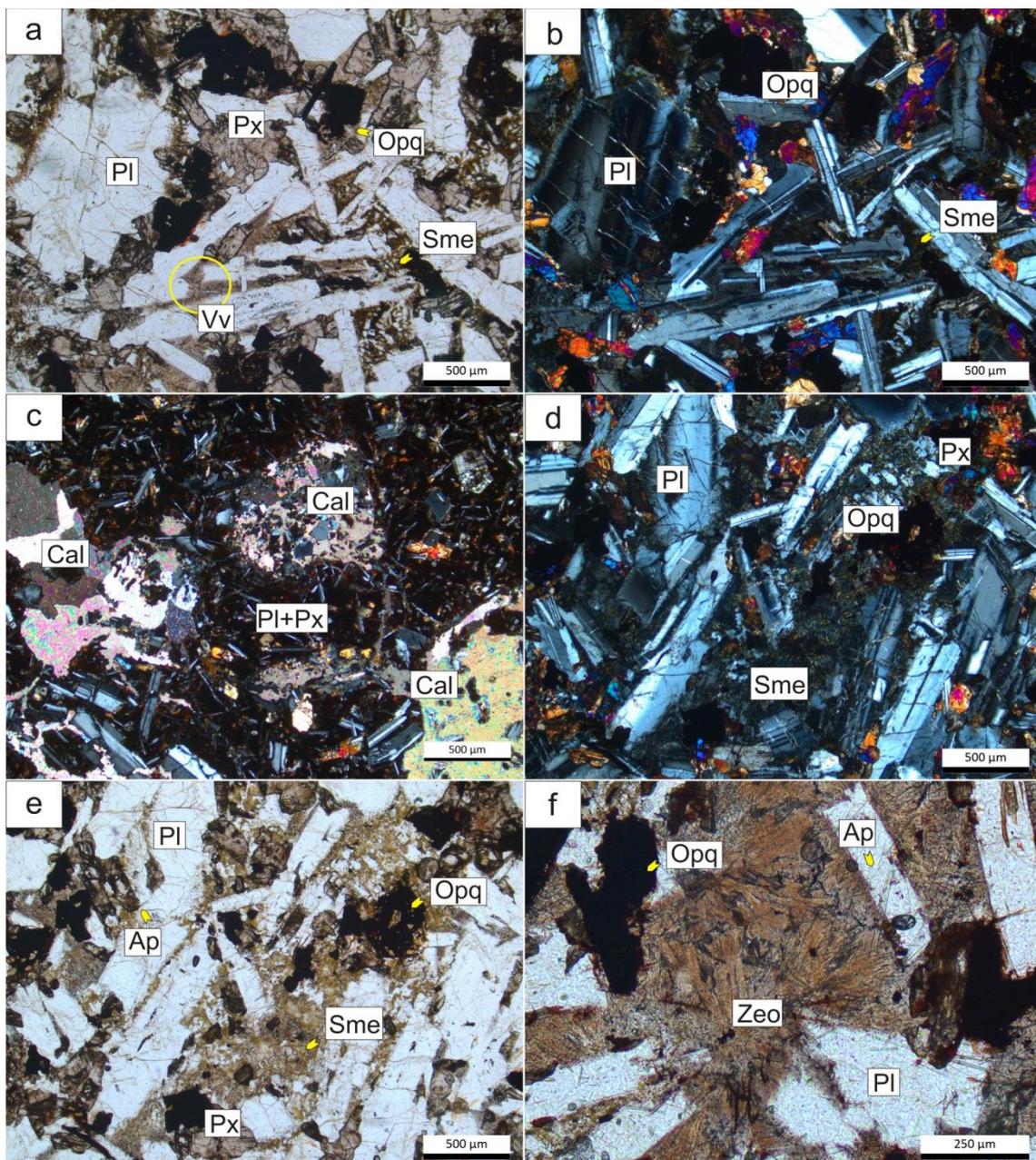


Figura 5.5. a y b. Nivel inferior P.Y1 y P.Y2. Plagioclasa fisuradas con bordes corroídos, augita tinaífera y minerales opacos. Vidrio relíctico en los interespacios asociado a arcillas esmectíticas, cloritas y sílice criptocristalina. Es abundante el apatito. c. Calcita relleno de las vesículas. d y e Nivel medio, P.Y2 y P.Y3, mayor tamaño de grano con similares características que el nivel inferior. La alteración de la mesostasis es levemente más marcada. f. Arcillas, zeolitas y cuarzo microgranular en los espacios intercristalinos.

a, e y f: Luz paralela. b, c y d: Nícoles cruzados.

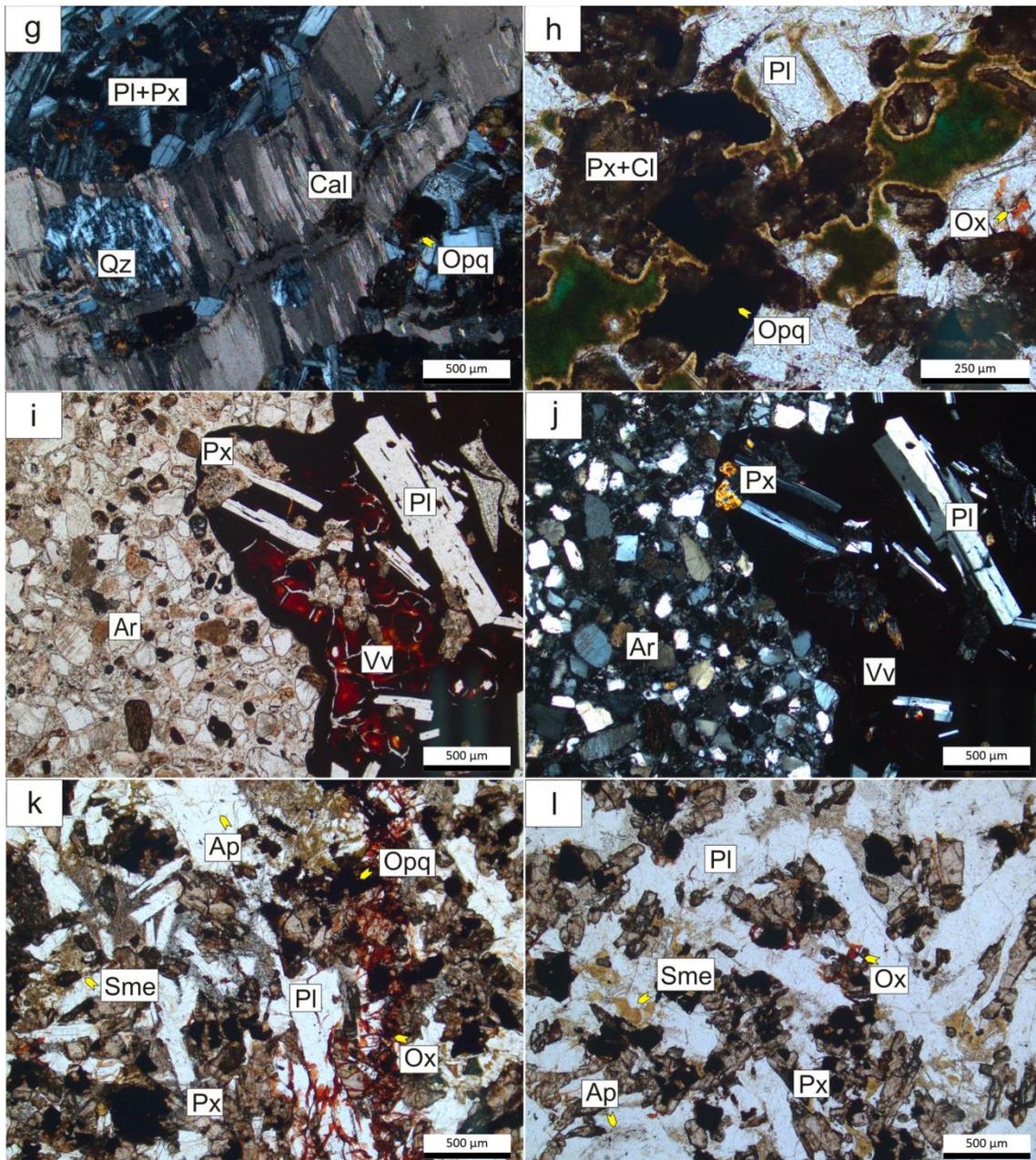


Figura 5.5. g. Venillas rellenas de calcita y calcedonia. h. Vesículas rellenas con minerales arcillosos. i y j. Arenisca cuarzosa con cemento silíceo en contacto con el basalto vesicular (con luz paralela y nicoles cruzados respectivamente). k. Abundante contenido de arcilla producto de la alteración de la mesostasis. l. Tablillas de plagioclasa fracturadas y piroxenos, sin marcada alteración. g y j: Luz paralela. h, i, k y l: Nicoles cruzados.

5.1.5.1 Análisis de testigos de perforación

En esta cantera se analizaron testigos de dos perforaciones con el fin de evaluar las variaciones de la roca en profundidad respecto a sus características texturales, mineralógicas, y grado de alteración. Ambos pozos se realizaron hasta una profundidad de 50 metros aproximadamente. En el pozo 1 se tomaron 26 muestras de testigos, mientras que en el número 2 se analizaron 22.

Como primer paso se realizó un análisis macroscópico. Esto permitió estimar una posible correlación entre ambos pozos según la aparición de ciertos niveles característicos en ambos, como por ejemplo un nivel vítreo que se registró a una profundidad aproximada entre 7 y 8 metros en cada perforación. La roca presenta variaciones en profundidad, siendo un basalto cada vez más vesicular (Figura 5.6). El relleno de las vesículas es variable en mineralogía y grado de cristalinidad. Se reconoce calcita, arcillas y zeolitas como minerales neoformados. La oxidación de ciertos niveles es extrema tiñendo a la roca de un color pardo oscuro.

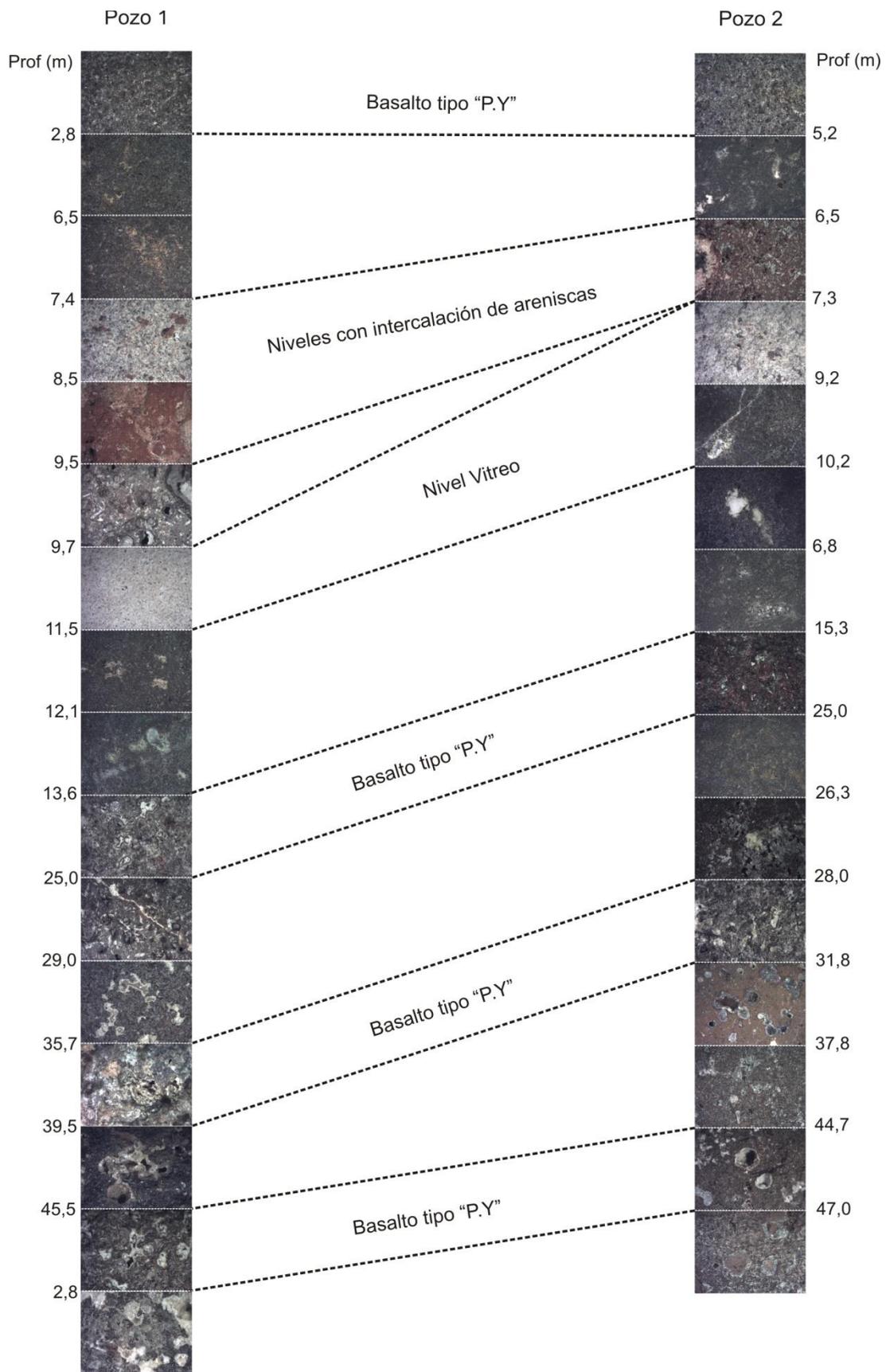


Figura 5.6. Correlación entre los pozos 1 y 2. Muestras macroscópicas.

Pozo 1 (de 0 a 50,60m)

- Muestra 1.1 (~2,0m)
- Muestra 1.2 (~2,8m)

Comienza con un basalto de textura intersertal, de grano medio, al microscopio se definió como un *basalto tipo "P.Y"**(Figura 5.7)

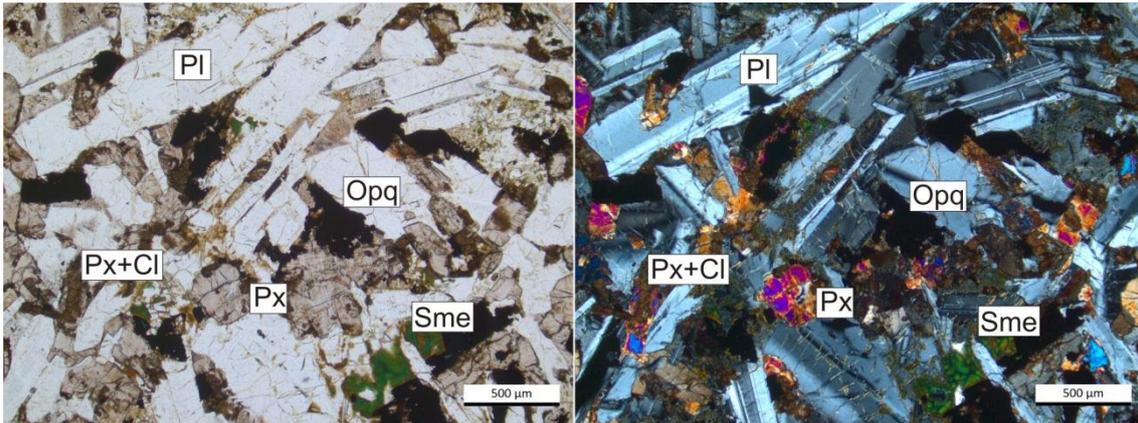


Figura 5.7. Basalto tipo "P.Y". Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados

** Basalto tipo "P.Y"*

La roca presenta textura intersertal, está constituida por fenocristales tabulares de plagioclasa de dimensiones milimétricas que varían entre 0,6mm y 1,2mm. Las tablillas tienen los bordes irregulares porque en ellos se alojan principalmente augita y minerales opacos. El mafito, augita titanífera, acompaña a la granulometría con bajo grado de desferrización. Se presentan zonas con alteración que se adjudican a vidrio volcánico desvitrificado, aunque se reconocen sectores aún isotrópicos de colores pardos considerados relictos de la palagonita original. La mineralogía de los interespacios dejados por las tablillas de feldespato es compleja compuesta por minerales arcillosos, óxidos e hidróxidos de hierro, cloritas, apatito y zeolitas. Se reconocen zonas de desmezclas en el feldespato que dan lugar a la cristalización, en sectores periféricos, de feldespato potásico en ocasiones asociado a cuarzo microcristalino.

- Muestra 1.3 (~6,0m)
- Muestra 1.4 (~7,4m)

La roca es un basalto, con textura intersertal, de características similares al nivel superior pero con menor granulometría. En la Figura 5.8 se puede observar el cambio en el tamaño de los componentes principales. Aumenta el contenido de

minerales opacos y se reconoce un mayor grado de alteración de la mesostasis y de algunos piroxenos, que se encuentran cloritizados.

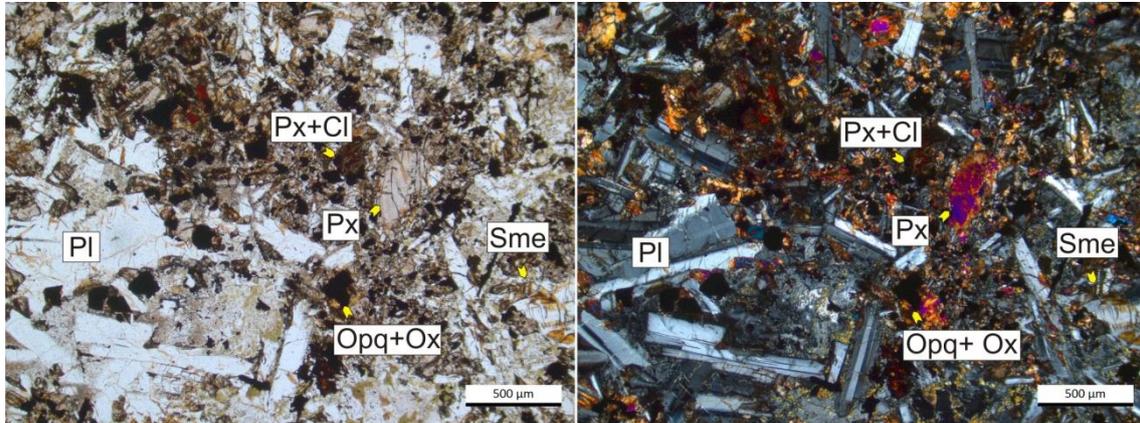


Figura 5.8. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.5 (~8,5m)

Aumenta nuevamente el tamaño de grano. La roca presenta textura intersertal. La corrosión en los bordes de la plagioclasa es mucho más marcada, algunos piroxenos de menor tamaño se encuentran moderadamente alterados al igual que la mesostasis (Figura 5.9).

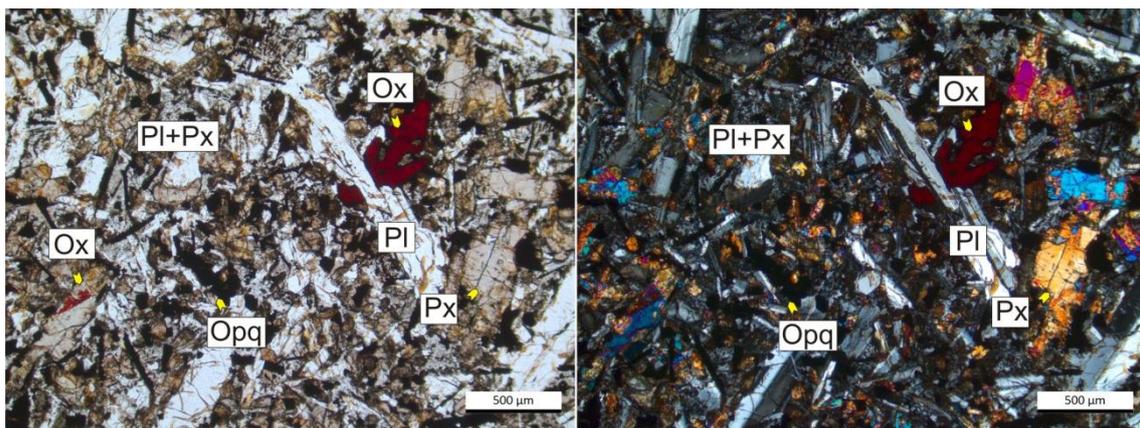


Figura 5.9. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados

- Muestra 1.6 (~9,5m)

El nivel corresponde a una arenisca constituida principalmente por cuarzo redondeado con cemento silíceo. Se reconocen clastos de mayor tamaño, de un basalto de textura

porfídica, con escasos fenocristales mayormente de plagioclasa, sin alteración, en una masa de grano más fino completamente teñida por óxidos de hierro (Figura 5.10).

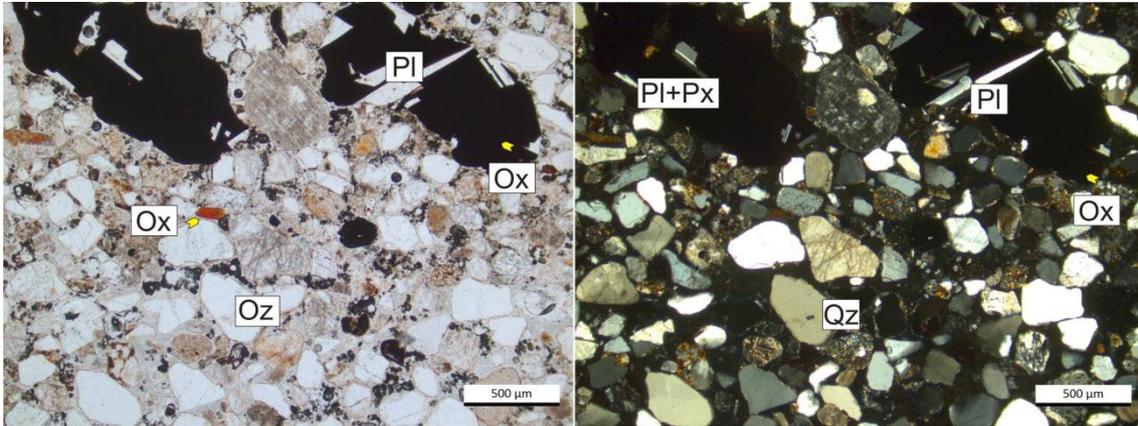


Figura 5.10. Arenisca. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 1.7 (~9,7m)

La muestra corresponde a una venilla de calcita y arenisca, del nivel 1.6, que corta el basalto. En la Figura 5.11 se reconoce a la derecha una roca de textura porfídica, con pasta oscura y escasa cantidad de fenocristales, similar a los clastos que alojaba la muestra anterior. Hacia la izquierda la cantidad de fenocristales es mayor y se identifican dentro de la pasta pequeños cristales de plagioclasa, dando lugar a una roca porfídica con pasta microlítica. Se reconocen vesículas rellenas con calcita y/o un material criptocristalino sobre los bordes de la cavidad, de baja birrefringencia, posiblemente adjudicado a zeolita.

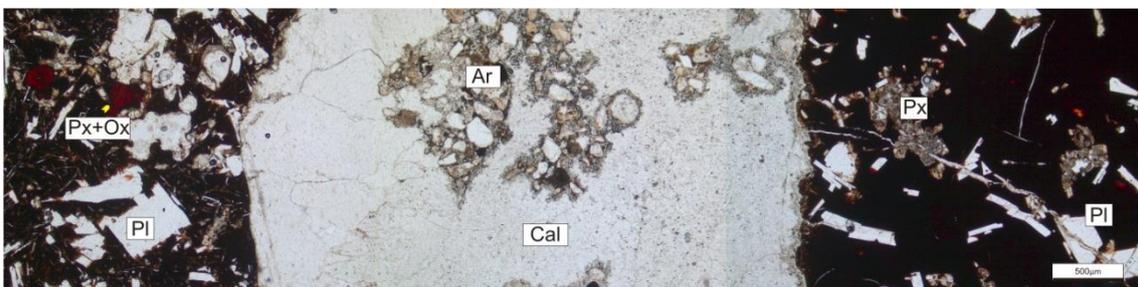


Figura 5.11. Venilla. Luz paralela.

- Muestra 1.8 (~10,10m)

Es un basalto vesicular, con las cavidades rellenas parcial o totalmente por calcita (Figura 5.12). Se observan pequeños cristales de plagioclasa con bordes corroídos, inmersos en una pasta de color oscuro teñida por óxidos de hierro. Hay cristales de mayor desarrollo cristalino de plagioclasa y piroxenos, sin evidencias de alteración.

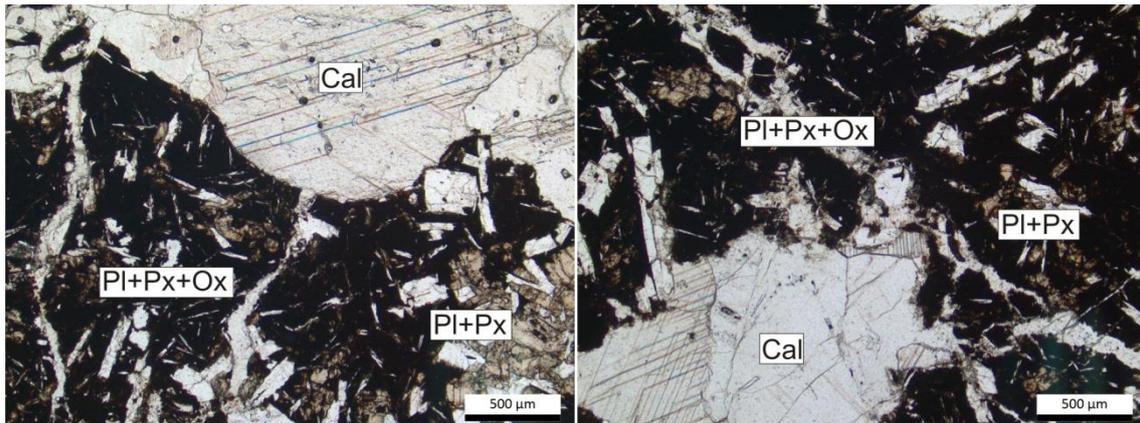


Figura 5.12. Basalto vesicular. Luz paralela

- Muestra 1.9 (~11,5m)

La muestra corresponde a una roca de textura vítrea, conformada casi exclusivamente por trizas de vidrio sin alteración, ni deformación evidente (Figura 5.13). El tamaño de las mismas es bastante homogéneo variando entre 200µm y 300µm.

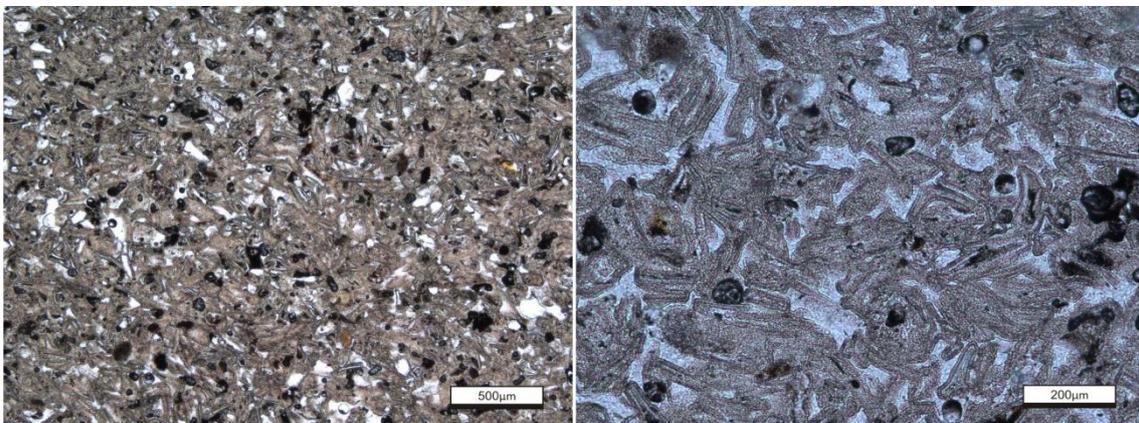


Figura 5.13. Nivel vítreo. Luz paralela

- Muestra 1.10 (~12,10m)

Basalto vesicular, de textura porfídica, con las cavidades tapizadas de arcillas y zeolitas de gran desarrollo cristalino. Es una roca con fuerte alteración de la mesostasis y de los cristales de menor desarrollo (100µm-200µm). Los fenocristales se presentan inalterados, con evidencia de asimilación periférica (Figura 5.14).

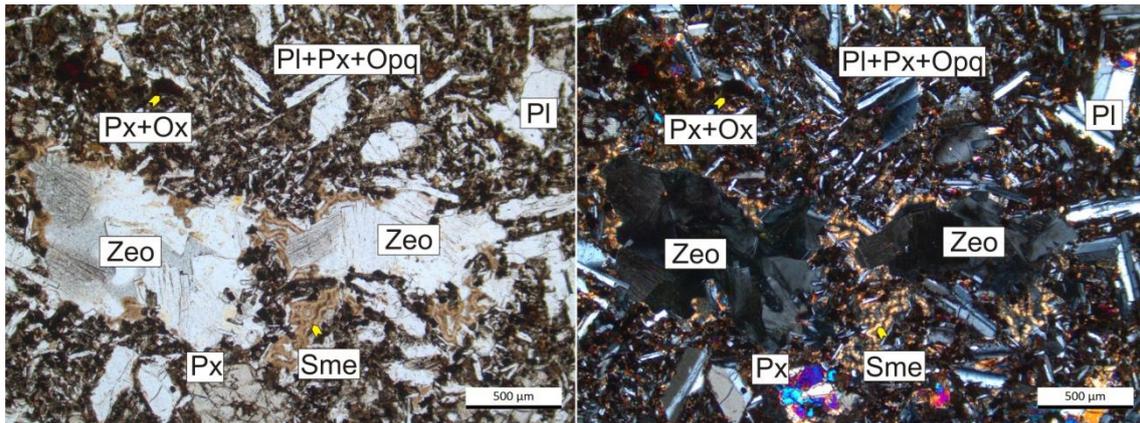


Figura 5.14. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.11 (~13,60m)

En esta roca se reconocen dos tipos de arreglos texturales (Figura 5.15), uno similar al nivel anterior (1.10) con una granulometría menor en sus componentes y vesículas rellenas de zeolita y/o arcillas, que contiene clastos de otro basalto con mayor desarrollo cristalino, con elevada alteración en la mesostasis y minerales máficos, mientras que los fenocristales de plagioclasa presentan inalterados.

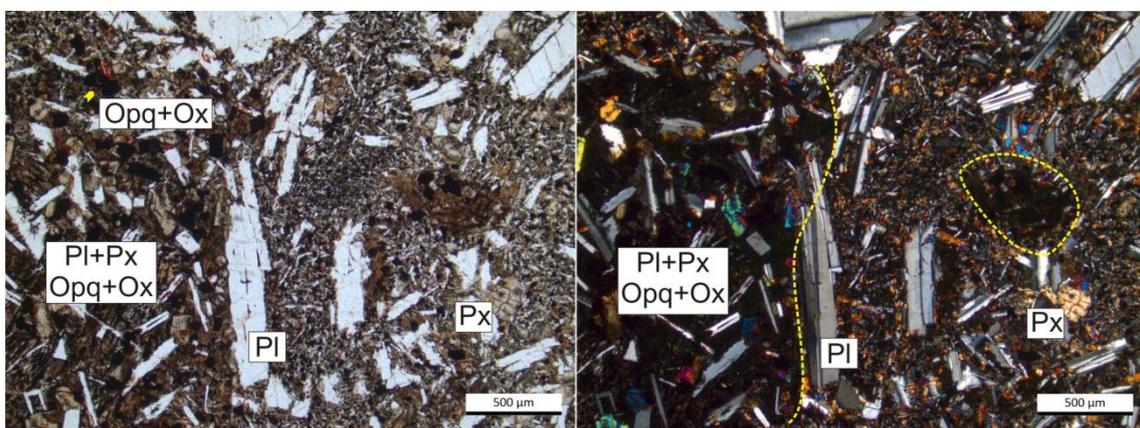


Figura 5.15. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.12 (~15,80m)
- Muestra 1.13 (~17,10m)
- Muestra 1.14 (~19,40m)
- Muestra 1.15 (~23,0m)
- Muestra 1.16 (~25,0m)

Las muestras representan un nivel de roca de casi 10 metros, sin notorias variaciones mineralógicas, ni texturales. Es un basalto de textura porfídica, de grano medio, con sectores vesiculares. La plagioclasa y los minerales máficos se encuentran sin alteración, conservando sus características ópticas. En los espacios intercrystalinos se reconocen arcillas del tipo esmectíticas producto de la desvitrificación del vidrio, con buen desarrollo cristalino. Se reconocen óxidos de hierro asociados a los minerales opacos. Las vesículas están rellenas con zeolitas que se disponen en forma de abanico (Figura 5.16).

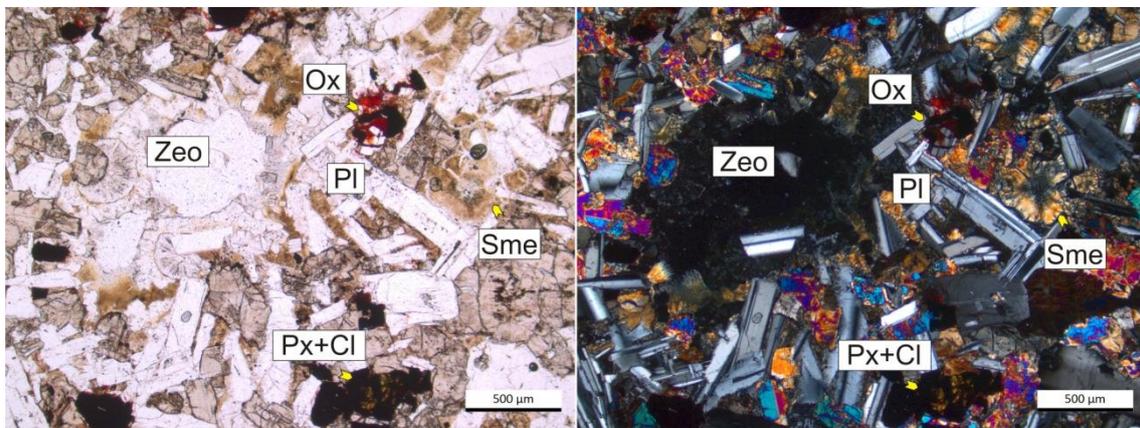


Figura 5.16. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.17 (~29,0m)

En esta muestra se vuelve a reconocer una intercalación de areniscas y basalto donde la oxidación extrema afectó a la mesostasis y a la pasta de la roca (Figura 5.17). Es posible observar como la oxidación afecta también al cemento de la arenisca. La plagioclasa y mafitos se encuentran sanos. En las vesículas es común la presencia de material arcilloso tapizando la cavidad.

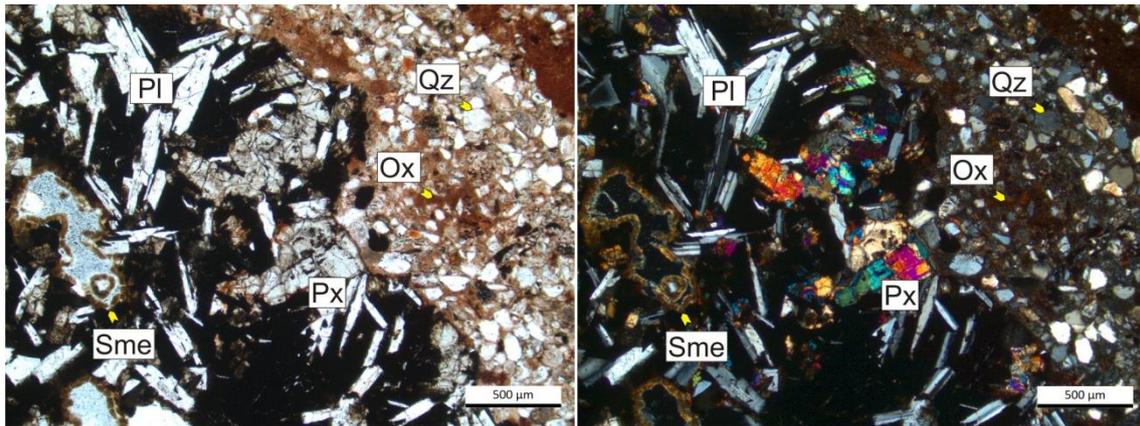


Figura 5.17. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.18(~30,0m)
- Muestra 1.19(~35,70)

En esta profundidad se identificó un basalto similar al tipo “PY”* (Figura 5.18). El grado de alteración de la roca es moderado afectando principalmente a la mesostasis y algunos minerales máficos de menor desarrollo que su entorno. Las plagioclasa se encuentran fracturada, pero sana. Se reconocen esmectitas en los espacios dejados por éstas.

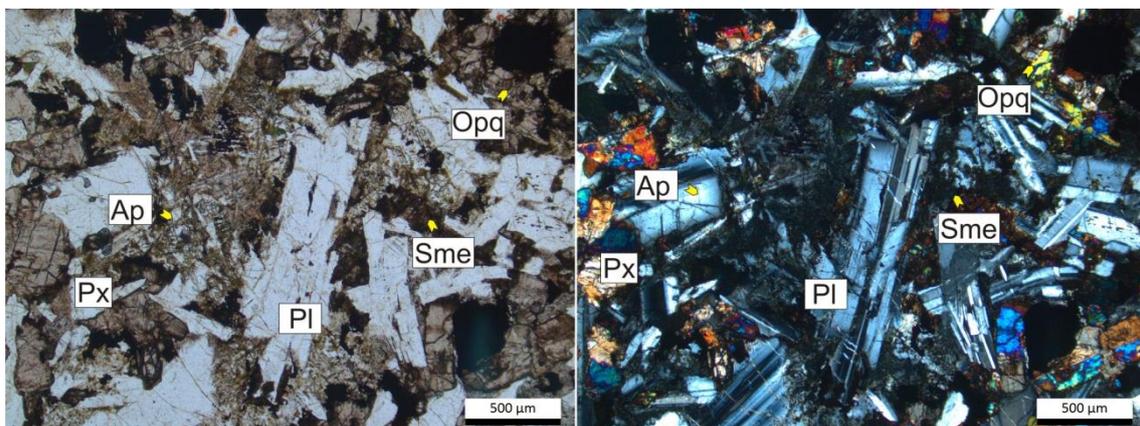


Figura 5.18. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.20(~37,8m)

La roca presenta fenocristales de plagioclasa y augita inalterados, agrupados de forma aislada en una pasta microgranular, dando lugar a una textura tipo glomerofídica. La pasta está fuertemente teñida por óxidos de hierro. Se presentan vesículas de gran

tamaño, donde cristalizan pequeños cristales de zeolitas (200 μ m) con buen desarrollo cristalino (Figura 5.19).

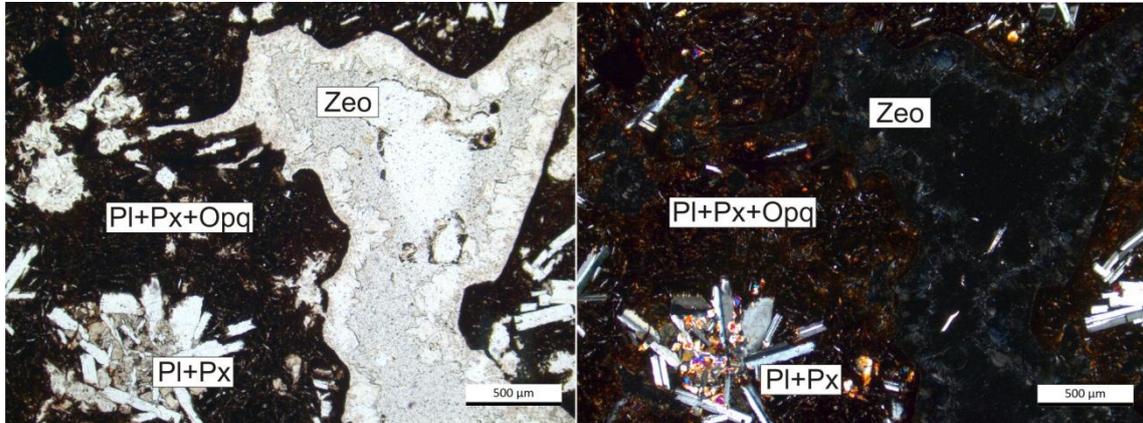


Figura 5.19. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 1.21 (~39,5m)

La roca presenta un contenido mayor que la anterior de óxidos de hierro, que afectan la pasta. Es posible reconocer minerales máficos y plagioclasa sin alteración. Las vesículas están colmadas de zeolitas de buen desarrollo cristalino (Figura 5.20).

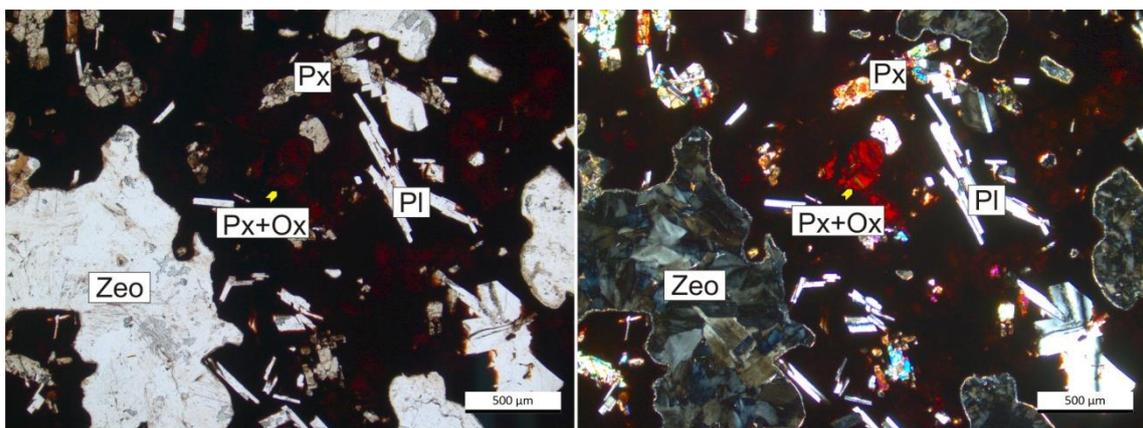


Figura 5.20. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 1.22 (~44,3m)
- Muestra 1.23 (~45,5m)

Ambas muestras corresponden a un basalto tipo "P.Y"* (Figura 5.21), compartiendo características de las muestras 1.18 (~30,0m) y 1.19 (~35,70), con un tamaño de grano levemente menor.

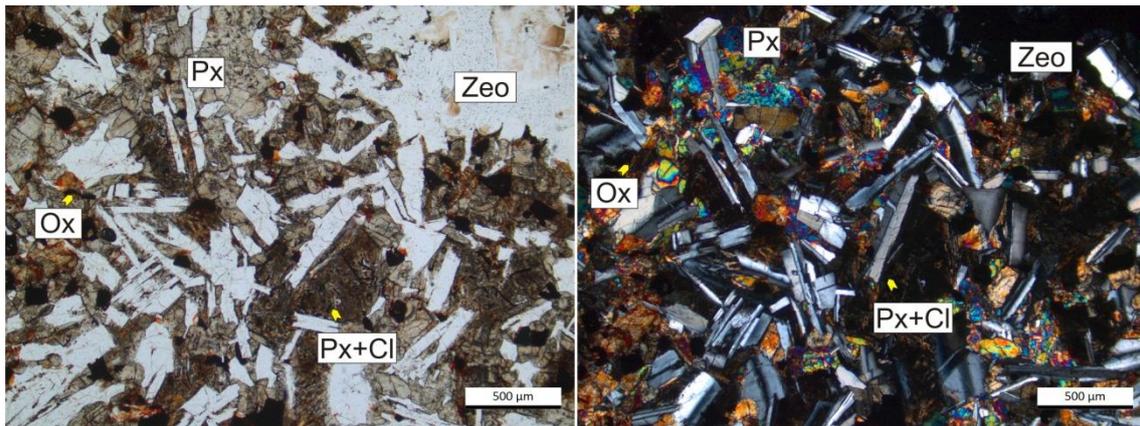


Figura 5.21. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicols cruzados.

- Muestra 1.24 (~47,5m)
- Muestra 1.25 (~48,5m)
- Muestra 1.26 (~50,0m)

A medida que se profundiza, si bien las características mineralógicas no varían mucho, se reconocen en estos niveles vesículas colmadas de zeolitas y arcillas (Figura 5.22). El grado de alteración de las rocas va disminuyendo de 1.24 a 1.26.

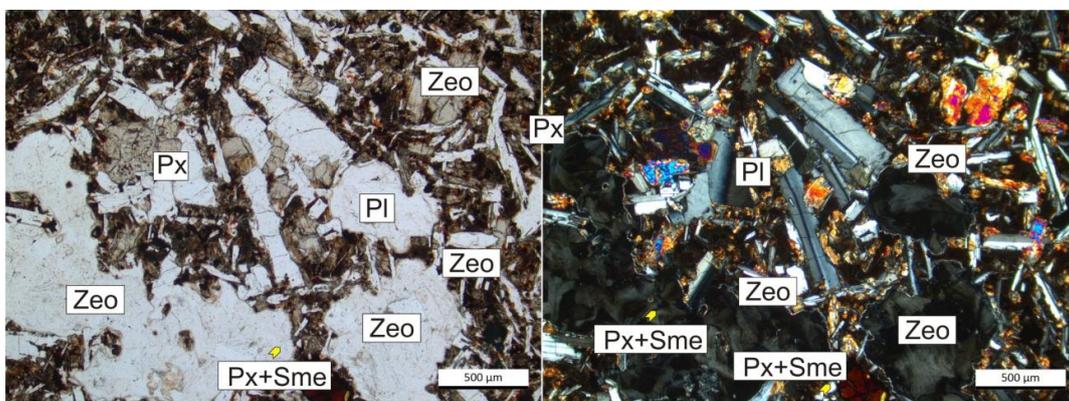


Figura 5.22. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicols cruzados.

Pozo 2 (0 a 50,40m)

- Muestra 3.1 (~3,5m)
- Muestra 3.2 (~4,5m)
- Muestra 3.3 (~4,8m)
- Muestra 3.4 (~5,2m)

Las muestras comprendidas en los primeros metros de profundidad corresponden aun basalto tipo "P.Y"* (Figura 5.23), compartiendo las características típicas descritas al inicio del pozo 1.

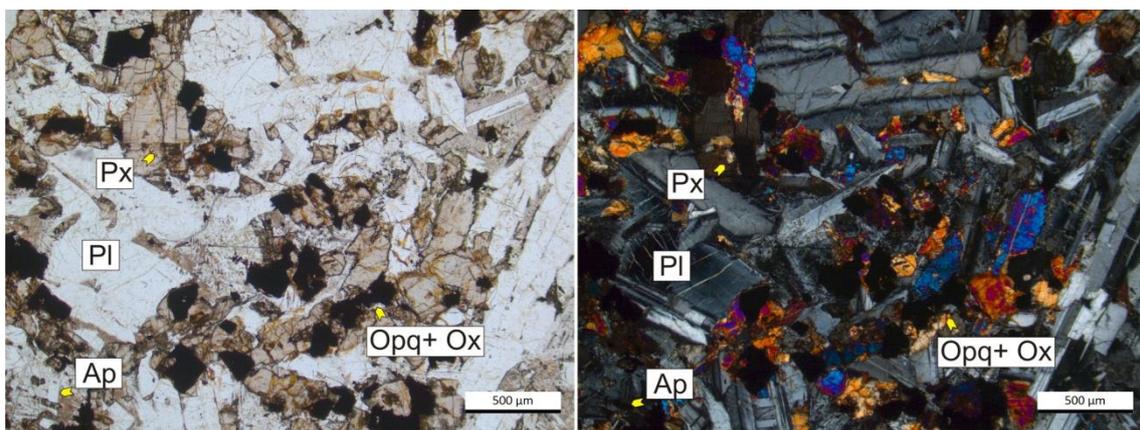


Figura 5.23. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.5 (~6,5m)

En la Figura 5.24 se observa el contacto entre dos tipos de basalto con características muy distintas. Si bien el estado y desarrollo de los fenocristales en ambos es similar, la tinción de la pasta con óxidos de hierro, es extrema en el basalto del ángulo inferior derecho de la imagen. Mientras que en el otro a pesar evidenciar alteración y oxidación aún es posible identificar la pasta microlítica que contiene los fenocristales.

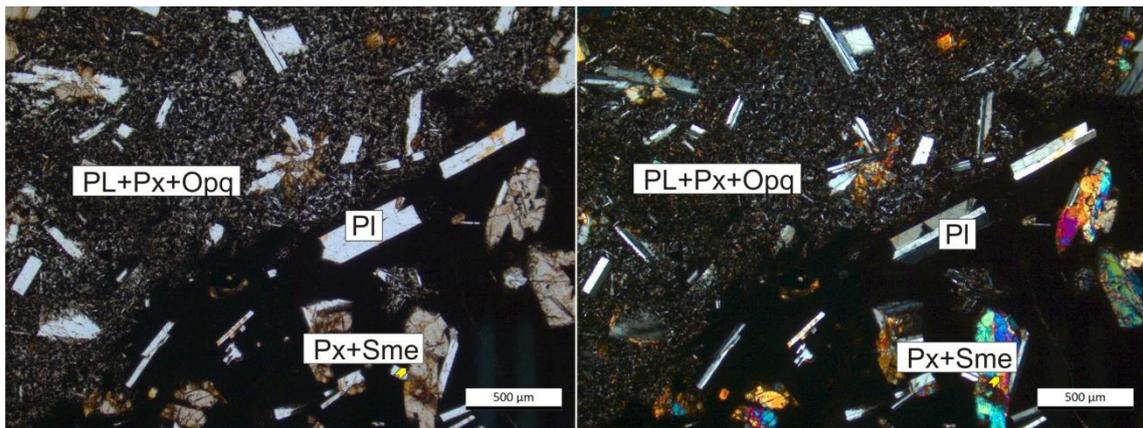


Figura 5.24. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.6 (~7,3m)

La muestra corresponde a un nivel con intercalaciones de arenisca constituida principalmente por cuarzo redondeado con cemento silíceo, en contacto con un basalto oscuro, debido al alto contenido de óxidos de hierro que afectan a la pasta (Figura 5.25).

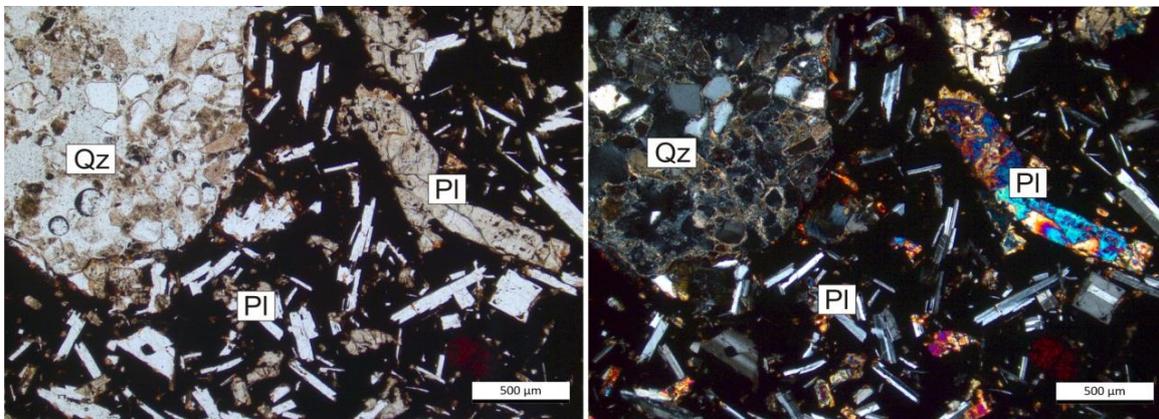


Figura 5.25. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.7 (~9,2m)

La muestra corresponde a una roca de textura vítrea, conformada casi exclusivamente por trizas de vidrio sin alteración. El tamaño de las mismas es bastante homogéneo variando entre los 150µm y 200µm (Figura 5.26).

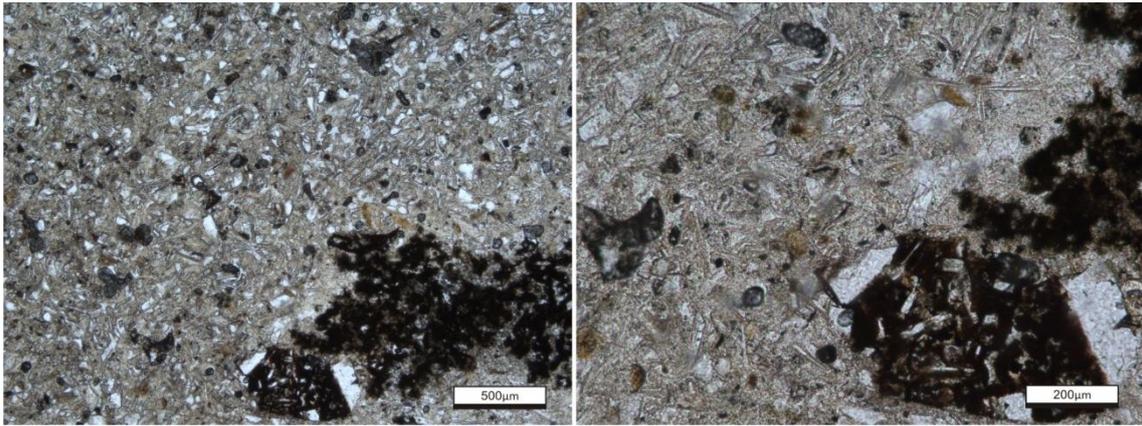


Figura 5.26. Nivel vítreo. Luz paralela.

▪ Muestra 3.8 (~10,2m)

La roca es un basalto con un elevado contenido de óxidos de hierro, que afectan la pasta. Es posible reconocer algunos minerales máficos y plagioclasa sin alteración. Las vesículas están colmadas de zeolitas de buen desarrollo cristalino (Figura 5.27).

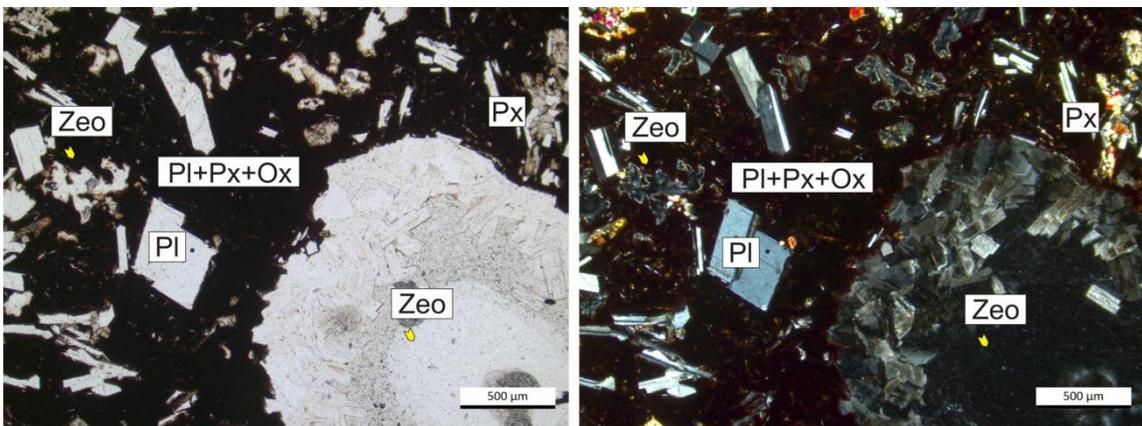


Figura 5.27. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicols cruzados.

▪ Muestra 3.9 (~13,70)

La roca es un basalto de textura porfídica del tipo "P.Y"* , con menor dimensión de sus componentes, los piroxenos de menor tamaño se encuentran totalmente cloritizados (Figura 5.28, indicado en línea de puntos) mientras que los de mayor desarrollo al igual que las plagioclasas están sanos.

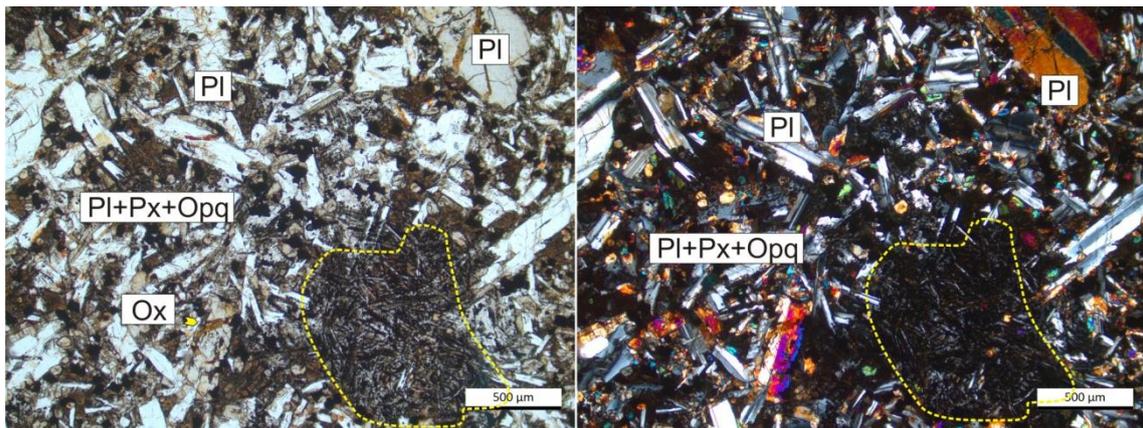


Figura 5.28. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.10 (~15,3m)

La roca es un basalto de textura porfídica con pasta microlítica. Los fenocristales se encuentran sanos. Los minerales opacos solo acompañan a la granulometría de la pasta (Figura 5.29).

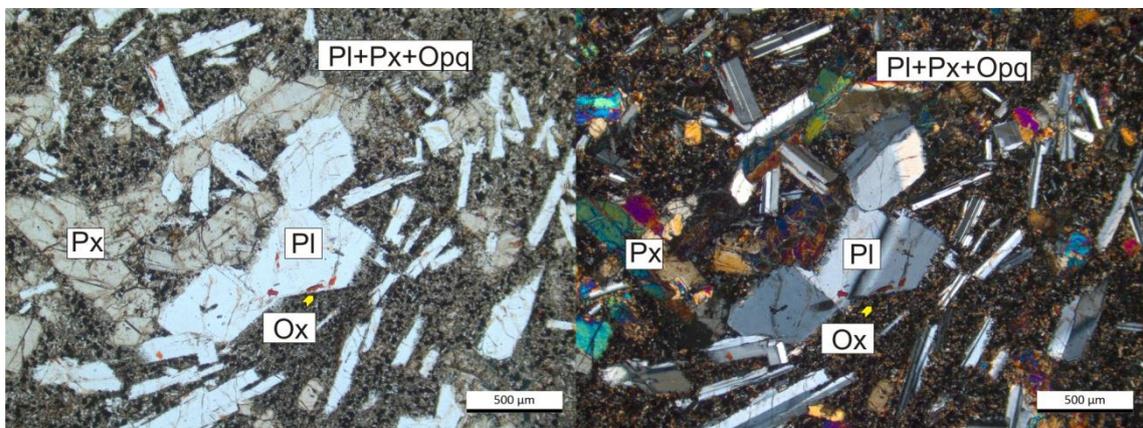


Figura 5.29. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.11 (~19,5m)
- Muestra 3.12 (~21,7m)
- Muestra 3.13 (~24,2m)
- Muestra 3.14 (~26,3m)

Las muestras comprendidas entre los 19 y 26 metros de profundidad corresponden a un basalto tipo "P.Y"* con alteración moderada en los componentes máficos y

desarrollo de arcillas esmectíticas como producto de la desvitrificación. Los minerales opacos se encuentran asociados a óxidos de hierro (Figura 5.30).

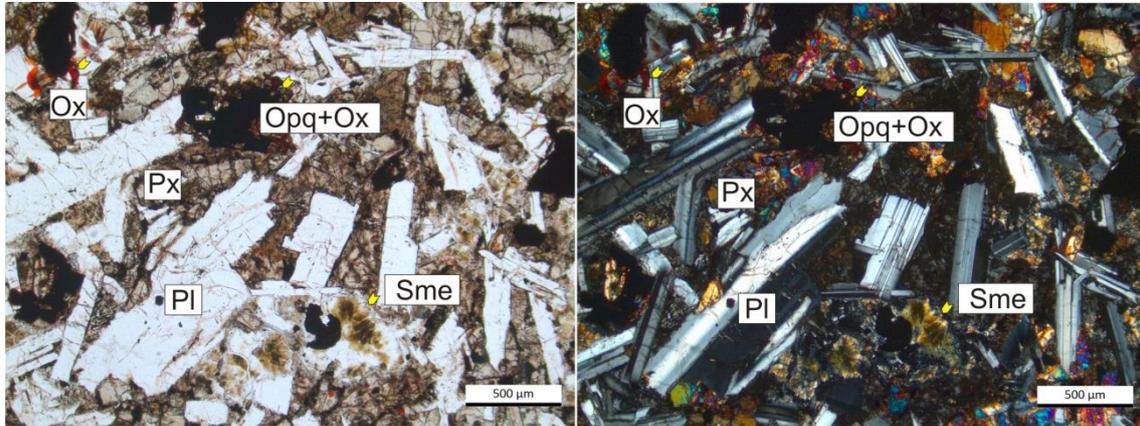


Figura 5.30. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.15 (~28,0m)

Es un basalto de textura porfídica, con mayor contenido de matriz en relación a los fenocristales, respecto a las descritas hasta ahora. La alteración de la pasta y el contenido de hierro son moderados. Los óxidos se alojan también en las fisuras que afectan a los minerales máficos (Figura 5.31).

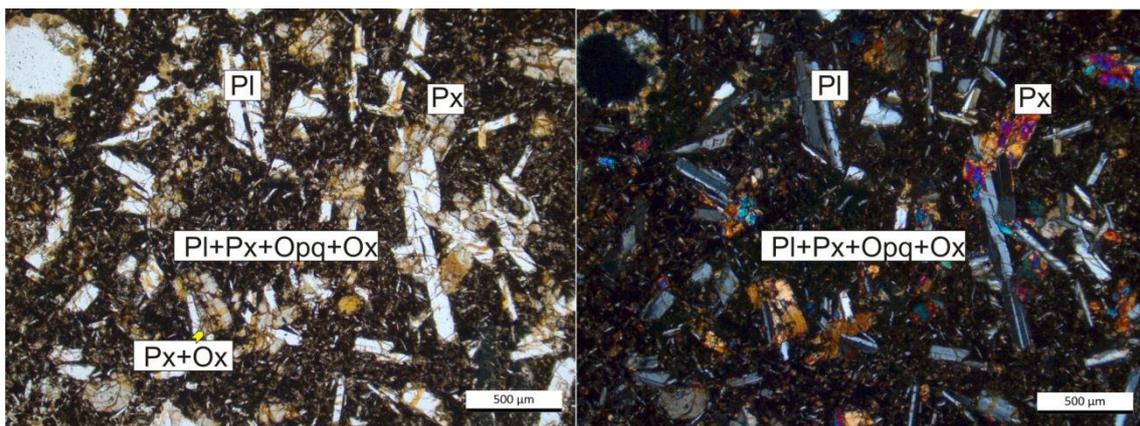


Figura 5.31. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.16 (~31,8m)

Es un basalto vesicular con alto contenido de hierro afectando la pasta. Se observan vesículas rellenas con zeolitas (~200µm) de buena cristalinidad (Figura 5.32).

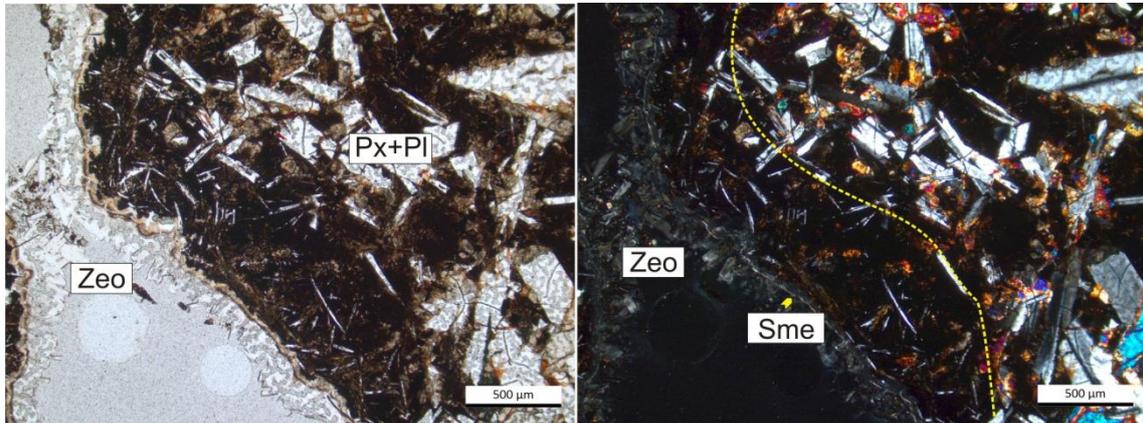


Figura 5.32. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.17 (~37,8m)

La muestra corresponde a un basalto tipo "P.Y"* con una granulometría levemente menor (Figura 5.33). Los fenocristales se encuentran sanos, aunque algunos piroxenos están cloritizados y desferrizados. La mesostasis está teñida con óxidos de hierro y se reconocen zeolitas rellenas las cavidades.

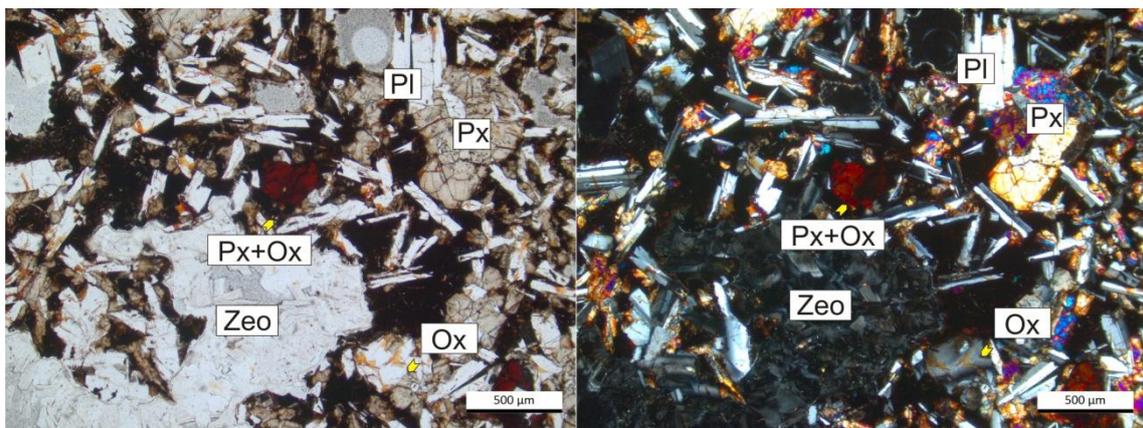


Figura 5.33. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.18 (~39,2m)

Se observa sectores donde el basalto engloba areniscas de grano muy fino. La pasta está fuertemente teñida por óxidos de hierro. En las cavidades cristalizó zeolita (Figura 5.34).

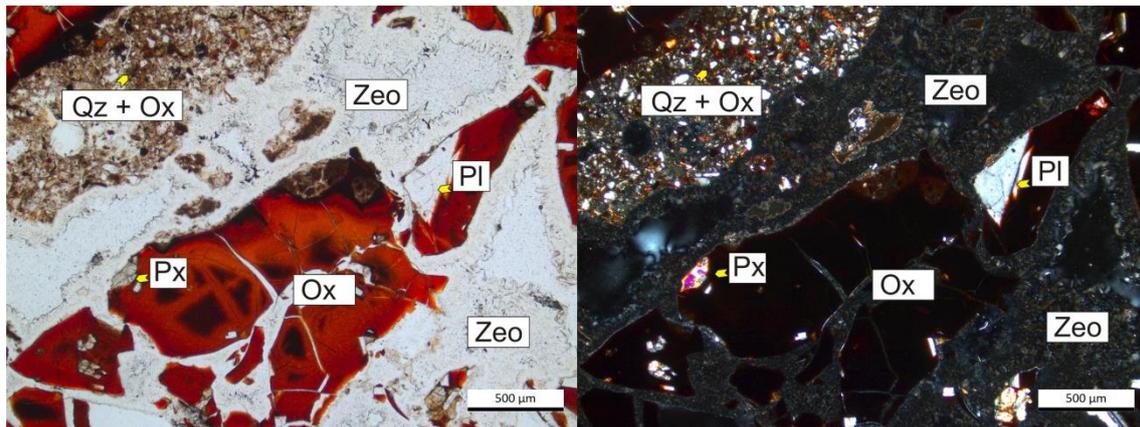


Figura 5.34. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

- Muestra 3.19 (~31,8m)

- Muestra 3.20 (~44,7m)

Basalto vesicular, de textura porfídica, cuyas cavidades están tapizadas con zeolitas de gran desarrollo cristalino. Es una roca con fuerte alteración de la mesostasis y en los cristales de menor desarrollo (100µm-200µm). Los fenocristales se presentan sanos, con evidencia de asimilación periférica (Figura 5.35).

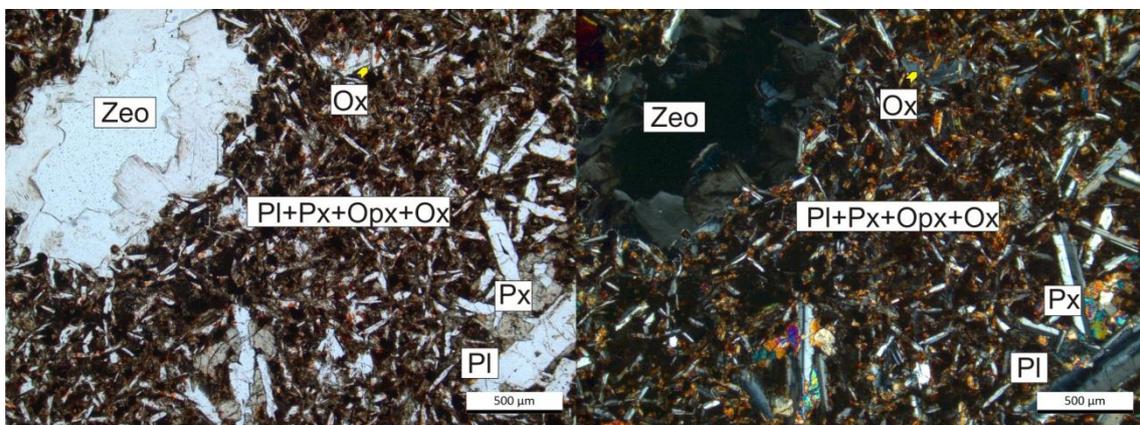


Figura 5.35. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.21 (~48,3m)

La roca corresponde al basalto de tipo "P.Y", con las características típicas. Además se observan sectores, en la meosotaxis, muy alterados y vesículas donde se desarrollaron arcillas esmectíticas (Figura 5.36).

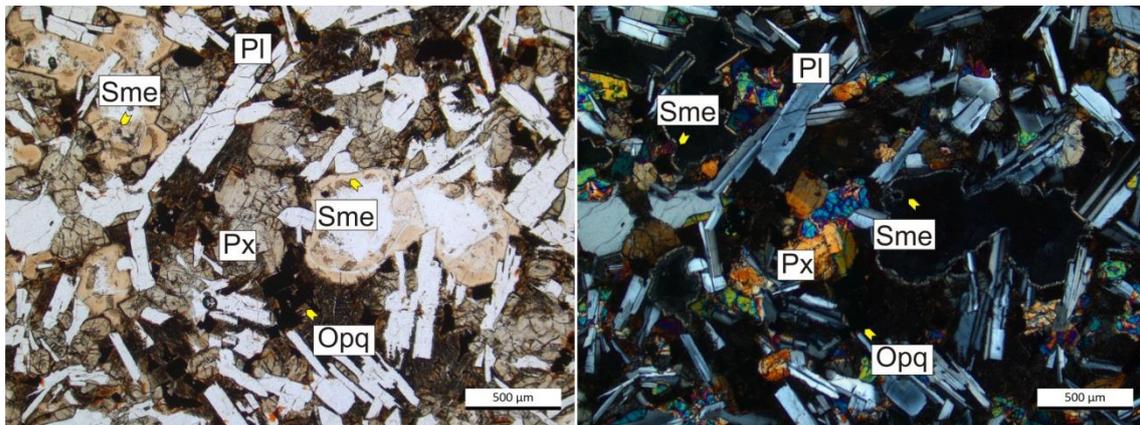


Figura 5.36. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

▪ Muestra 3.22 (~47,0m)

El arreglo textural y la alteración de la roca, es similar a la muestra 3.21 aunque el desarrollo cristalino es menor, se reconocen grandes vesículas con formación de zeolitas en ellas (Figura 5.37).

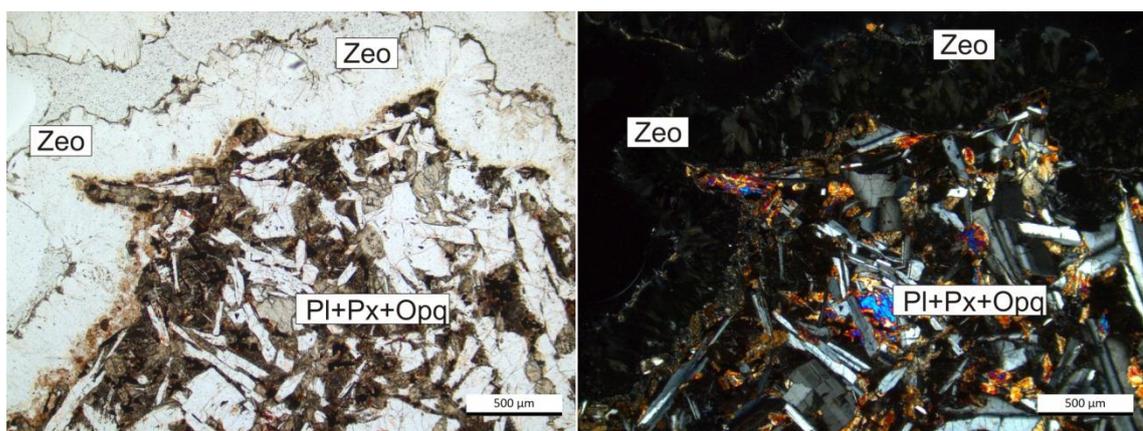


Figura 5.37. Izquierda con luz paralela. Derecha con nicoles cruzados.

5.2 Geoquímica

Como se mencionó en el capítulo anterior, se seleccionaron las muestras de los niveles medios de cada frente en cada una de las canteras estudiadas para realizar análisis químicos de elementos mayoritarios, minoritarios y traza sobre roca total.

5.2.1 Elementos mayoritarios y minoritarios

Teniendo en cuenta las características petrográficas descritas, los resultados de los análisis químicos deben ser utilizados con precaución considerando que algunas de las rocas se encuentran afectadas por procesos de alteración. El estudio con microscopio óptico evidenció procesos superpuestos que generaron alteración de los minerales primarios y del vidrio volcánico. Los productos de neoformación rellenaron microfisuras y cavidades. La presencia de cloritas, zeolitas, esmectitas, sanidina, minerales opacos, illita, epidoto y carbonatos, se relaciona con las variaciones observadas en los contenidos de CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y MnO. Por otra parte, no se observó un incremento significativo en el contenido de sílice en aquellas muestras que contienen cuarzo o sílice criptocrystalina, debido a que se encuentran en porcentajes muy bajos, principalmente en los interespacios cristalinos.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de los análisis químicos de elementos mayoritarios y minoritarios expresados en % en peso de los óxidos, donde puede observarse que el contenido de SiO₂ varía entre 49% y 55%, Al₂O₃ entre 12% y 14%, Fe₂O₃ entre 12% y 16%, CaO entre 6% y 9%, MgO entre 3% y 5%. El Na₂O presenta valores homogéneos cercanos a 2,5%, mientras que el K₂O registra valores cercanos a 1,5%. El TiO₂ muestra gran variación con valores máximos que superan el 3,5% y mínimos cercanos a 1,3%. Los valores de MnO y P₂O₅ oscilan entre 0,15% y 0,39%.

Tabla 5.1. Resultados de los análisis químicos de elementos mayoritarios y minoritarios
(% en peso de los óxidos).

Cantera/ Muestra	Mayoritarios							Minoritarios			LOI
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	
L.Ai	49,7	12,2	16,1	4,5	8,3	2,6	1,4	0,2	3,5	0,4	0,6
L.Am	49,8	12,3	16,2	4,4	8,2	2,7	1,4	0,2	3,5	0,4	0,7
L.As	50,1	12,5	15,5	4,4	8,4	2,7	1,5	0,2	3,5	0,4	0,5
L.Mi	50,0	12,2	16,1	4,3	8,3	2,6	1,4	0,2	3,5	0,4	0,5
L.Mm	49,8	12,2	16,3	4,4	8,3	2,6	1,4	0,2	3,5	0,4	0,6
L.Ms	49,8	12,3	15,9	4,4	8,3	2,6	1,4	0,2	3,5	0,4	0,8
L.Di	54,4	12,6	14,5	3,4	7,0	2,9	1,8	0,2	1,8	0,4	0,7
L.Dm	54,9	12,7	14,0	3,4	6,9	3,0	1,8	0,2	1,8	0,4	0,6
L.Ds	55,1	12,3	14,6	2,7	6,1	3,1	2,1	0,2	1,9	0,3	1,3
Yi	52,6	13,7	12,3	5,2	8,8	2,6	1,3	0,2	1,4	0,2	1,5
Ym*	53,0	14,5	12,2	5,0	8,9	2,6	1,4	0,1	1,4	0,2	2,9
Ys*	52,2	14,5	12,7	5,7	8,6	2,4	1,1	0,1	1,4	0,2	5,7
P.Yi	49,7	11,9	16,2	4,8	8,8	2,3	1,3	0,2	3,1	0,4	1,0
P.Ym	49,5	11,6	16,3	4,8	8,6	2,3	1,2	0,2	3,2	0,4	1,6
P.Ys	49,6	11,8	16,6	4,4	8,7	2,3	1,2	0,2	3,2	0,4	1,2

*valores recalculados a 100 en composiciones libres de volátiles (LOI = 0)

En el diagrama de clasificación álcalis totales vs. sílice de Le Bas *et al.* (1986) las rocas se ubican dentro del campo de los basaltos, las muestras de las canteras “L.D” y “Y” se desplazan hacia el límite intermedio con valores de SiO₂ mayores (Figura 5.38a), esto se adjudica a la cristalización de cuarzo anhedral y sílice criptocristalina observados en el microscopio óptico. El diagrama AFM propuesto por Irvine y Baragar (1971), muestra el carácter toleítico de las rocas, con incremento de Fe con respecto al Mg (Figura 5.38b).

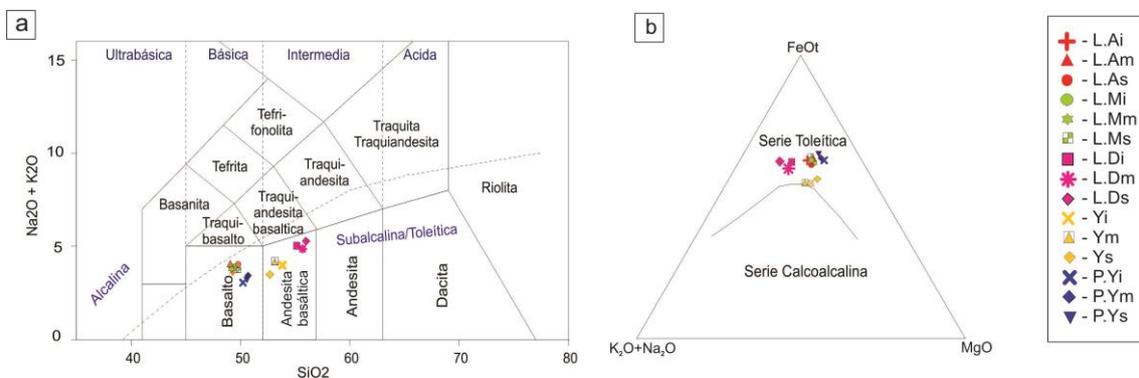


Figura 5.38. a. Diagrama TAS (Na₂O + K₂O) vs. SiO₂ (Le Bas *et al.* 1986). b. Diagrama de variación AFM (Irvine y Baragar 1971).

Se registran valores elevados de óxidos de hierro (>12%) adjudicado a la abundancia de minerales opacos y oxi-hidróxidos de Fe-Ti presentes en las rocas, tiñéndolas localmente de un color pardo-rojizo. Al igual que en la Figura 5.38a, las muestras de las canteras “L.D” y “Y” se desplazan hacia valores más altos de SiO₂ (≥ 50% en peso).

El grado de alteración de las rocas, se ve reflejado en los análisis químicos en relación a la pérdida de peso por ignición (LOI). Las muestras de las canteras “P.Y” y “Y” presentan los valores más elevados, con un promedio de 1,3% y 3,4% respectivamente, mientras que las restantes varían entre 0,6% y 0,8%. Los valores de álcalis no varían significativamente a pesar que se reconocieron niveles con sanidina.

Considerando la relación Al - Fe_t+Ti - Mg propuesta por Jensen (1976) las rocas se definen como basaltos toleíticos ricos en Fe (Figura 5.39a). Según Pearce *et al.* (1977) en función de la relación MgO - FeO_t- Al₂O₃ las rocas pertenecen a basaltos de tipo continental (Figura 5.39b).

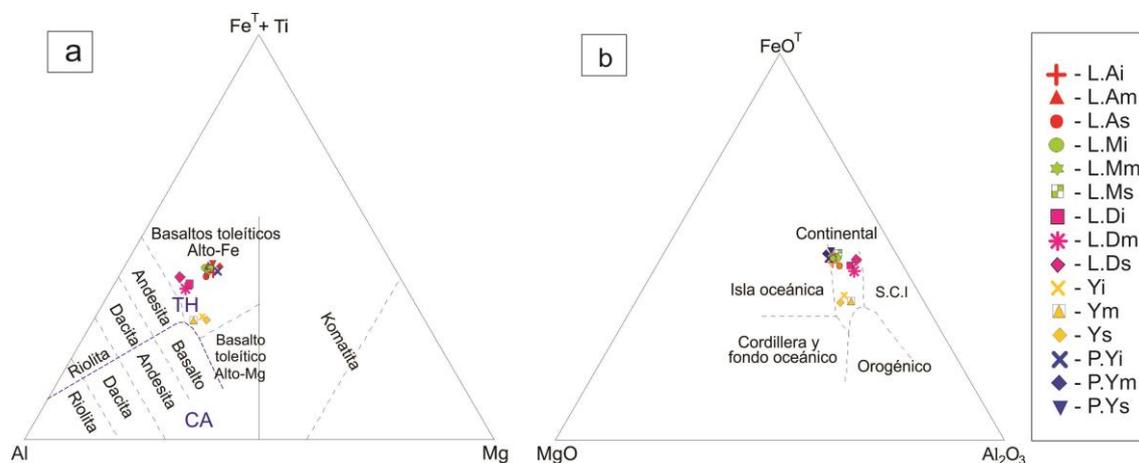


Figura 5.39.a. Diagrama de relación Al - Fet+Ti - Mg propuesta por Jensen (1976). b. Diagrama de relación MgO - FeO_t- Al₂O₃ de Pearce *et al.* (1977).

5.2.2 Elementos traza

Los elementos traza son mejores indicadores, especialmente si hay alteración, para discriminar tipos de basalto, ya que existe una gran similitud en la química de los elementos mayoritarios entre MORB, basaltos toleíticos de tras-arco y basaltos del arco volcánico (Perfit *et al.* 1980). En la Tabla 5.2 se muestra los resultados de los análisis químicos de los elementos traza. Utilizando los diagramas de Wood (1980), los basaltos estudiados se ubican en su mayoría dentro del campo de basaltos alcalinos de intraplaca (WPT). Sólo las muestras de las canteras “L.D” y “Y” se ubican en el campo de basaltos calco-alcalinos (CAB) con valores promedio de Th de 6,8ppm y 4,9ppm respectivamente (Figura 5.40).

Existe cierta incertidumbre sobre la movilidad del Th en basaltos alterados, e idealmente este diagrama debería ser utilizado cuando las muestras no contienen una gran proporción de vidrio alterado, ya que puede hacer que los puntos se ubiquen en campos incorrectos (Rollinson, 1993). Por otra parte, el fraccionamiento de la mayoría de los silicatos tiende a eliminar Th y Hf de la fusión, generando un líquido residual con concentraciones más altas de Th. La magnetita, por el contrario, concentra Ta con respecto a Hf y Th y así la acumulación del óxido de hierro desplazará la composición del líquido hacia el vértice Ta del diagrama.

Tabla 5.2. Análisis químicos de elementos traza (ppm).

Cantera/Muestra	Rb	Ba	Sr	V	Ni	Zr	Sc	Nb	Y	Ga	Co	Pr	Hf	Th
L.Ai	27	431	430	523	30	247	33	22	34	22	39	9	7	3,5
L.Am	29	437	439	504	34	255	32	22	35	23	40	9	7	3,1
L.As	29	454	432	507	29	257	33	22	36	23	39	9	7	3,1
L.Mi	29	434	422	505	31	251	32	21	35	21	38	9	6	3,0
L.Mm	28	459	445	521	32	253	33	21	36	22	40	9	7	3,2
L.Ms	28	444	438	517	30	247	32	20	35	21	39	9	7	3,4
L.Di	63	378	215	479	21	172	34	12	34	20	40	6	5	6,2
L.Dm	65	382	229	474	21	187	34	14	33	21	40	7	5	6,4
L.Ds	78	447	216	385	<20	259	32	17	51	20	38	8	7	7,8
Yi	42	299	237	361	45	135	36	9	26	18	41	5	4	5,1
Ym	46	314	237	367	45	141	36	10	25	20	41	5	4	5,0
Ys	27	401	286	364	46	140	36	10	26	19	39	5	4	4,7
P.Yi	28	350	227	511	46	258	42	19	44	19	43	8	7	2,9
P.Ym	27	355	223	498	45	262	41	20	44	19	44	8	7	3,3
P.Ys	28	377	242	519	40	266	41	21	47	19	42	8	7	3,3

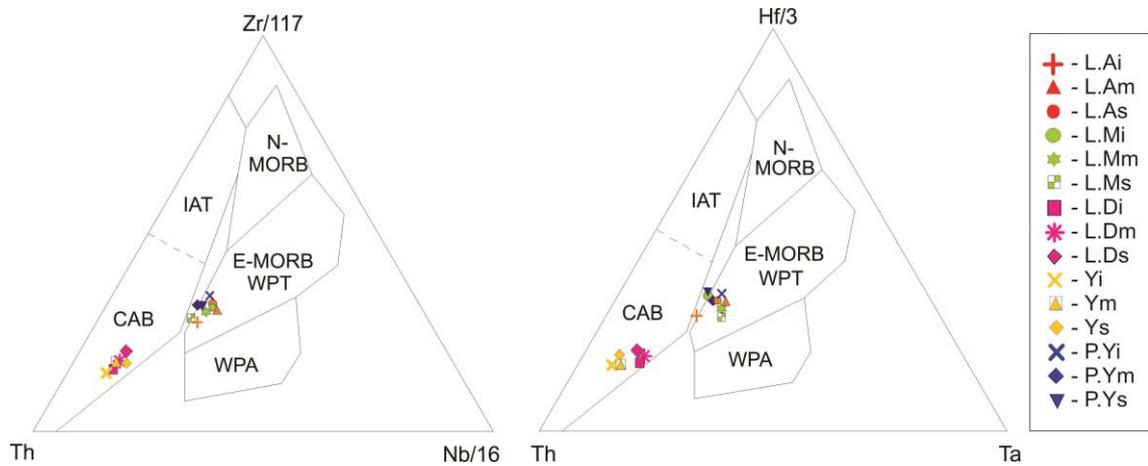


Figura 5.40. Diagramas de discriminación tectónica según Wood (1980) IAT: toleitas de Meo-
isla; CAB: Basaltos calco-alcalinos; WPA: basaltos alcalinos de intraplaca; WPT: toleitas de
intraplaca; E-MORB: MORB empobrecido; N-MORB: MORB normales.

Los resultados de Ti, Zr y Sr se volcaron en el diagrama de discriminación de Pearce y Cann (Figura 5.41a) dando como resultado que estos basaltos serían en su mayoría tipo WPT y escasos tendrían características CAB. Sin embargo el Sr es un elemento relativamente móvil, demostrado por la acción de fluidos hidrotermales en facies de muy baja presión y temperatura (zeolita y prehnita-pumpellita) en el metamorfismo de basaltos (Morrison 1978, Smith y Smith 1976), por lo cual los diagramas sólo son útiles en el caso de rocas frescas.

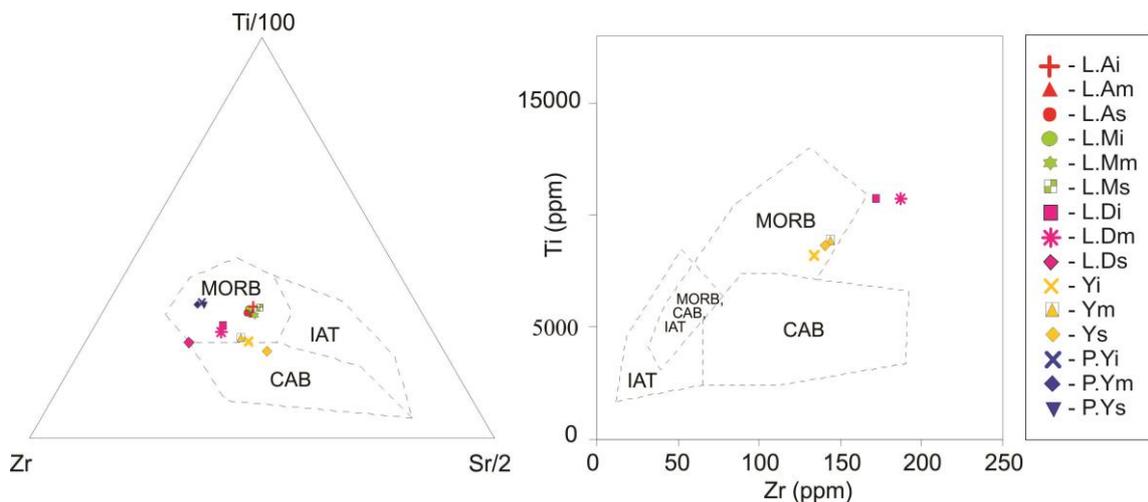


Figura 5.41. Proyección de las rocas en los diagramas de discriminación del ambiente tectónico
de Pearce y Cann (1973). CAB: Basaltos calco-alcalinos; MORB: basalto de dorsal oceánica. IAT:
toleíticos de arco de isla.

El Ti y V son miembros de la primera serie de transición en la tabla periódica y se comportan de manera diferente en los silicatos. Esta es la base del diagrama de discriminación de Shervais (1982), que se utiliza para distinguir entre basaltos toleíticos de arco volcánico, MORB y basaltos alcalinos (Figura 5.42).

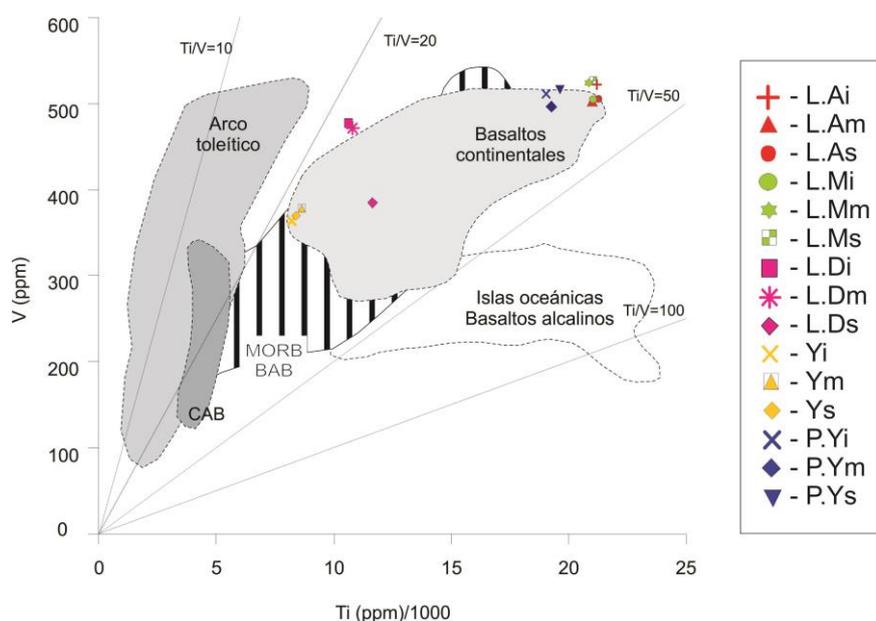


Figura 5.42. Diagrama de discriminación tectónica de Shervais (1982). CAB: Basaltos calcoalcalinos. MORB: basalto de dorsal oceánica. BAB: basaltos de cuencas de trasarco.

Los coeficientes de partición del vanadio son muy variables y en minerales como ortopiroxenos, clinopiroxenos y magnetita varían en varios órdenes de magnitud en función de fugacidad del oxígeno. Esto es debido a que el vanadio puede presentarse en estados reducidos (V^{3+}) u oxidados (V^{4+} , V^{5+}) en magmas naturales, en contraste con el titanio que existe sólo como Ti^{4+} .

Las variaciones en las concentraciones de V, relativas al Ti, actúan por lo tanto como una medida de la actividad del oxígeno de un magma y de los procesos de fraccionamiento que han tenido lugar. Por otro lado, el Ti y V son inmóviles en condiciones de alteración hidrotermal y en grados intermedios a altos de metamorfismo. Las muestras estudiadas presentan un grado de alteración variable evidenciado en el contenido de estos elementos.

Cann (1970) analizó la relación Zr vs. K, para determinar el grado de alteración que presentan las rocas (Figura 5.43.a). Según este autor, aquellas que se ajustan a la recta teórica pueden ser consideradas frescas (círculo) o con muy bajo grado de alteración respecto a las que se separan de la tendencia, reflejando alteración. De manera coherente con los diagramas analizados anteriormente las canteras "L.D" y "Y" se separan del resto, alejándose de la recta teórica. Por último los datos geoquímicos fueron trazados en el diagrama triangular de discriminación tectónica Zr/4, 2xNb e Y (Meschede 1986) donde las rocas se proyectan en el campo de basaltos toleíticos de intraplaca (Figura 5.43.b).

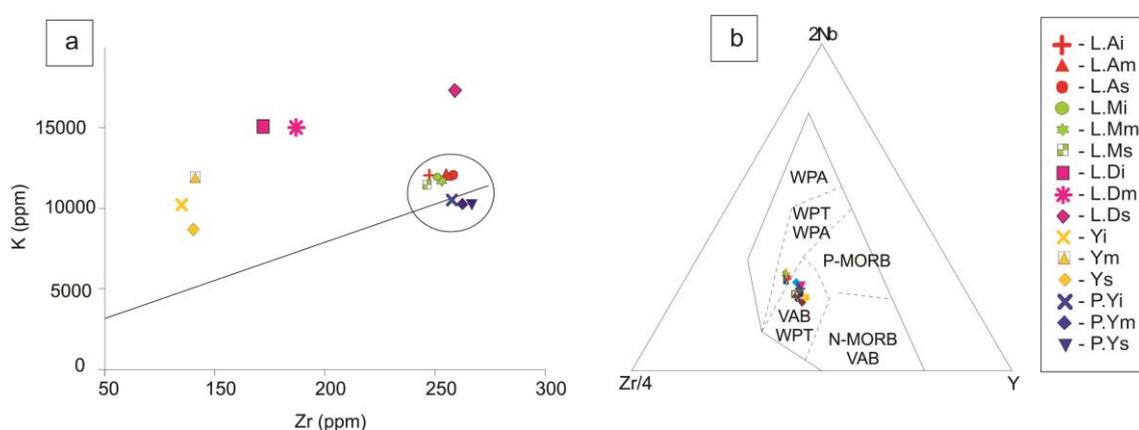


Figura 5.43a. Diagrama de correlación Zr vs. K (Cann 1970). b. Proyección de las rocas en los diagramas de discriminación del ambiente tectónico de aparición de rocas basálticas 2Nb-Zr/4-Y (Meschede, 1986). WPA: basaltos de intraplaca; MORB: basaltos centro oceánicos; WPA: basaltos alcalinos de intraplaca; WPT: toleitas de intraplaca; VAB: basaltos de arcos volcánicos; P-MORB: MORB de pluma; N-MORB: MORB normales.

En la Figura 5.44 se observan los diagramas de elementos de las tierras raras normalizados a condritas, según Boynton (1984), mostrando un comportamiento relativamente homogéneo, con marcado paralelismo entre las rocas, un enriquecimiento relativo en tierras raras livianas respecto de las pesadas y anomalías negativas de Eu.

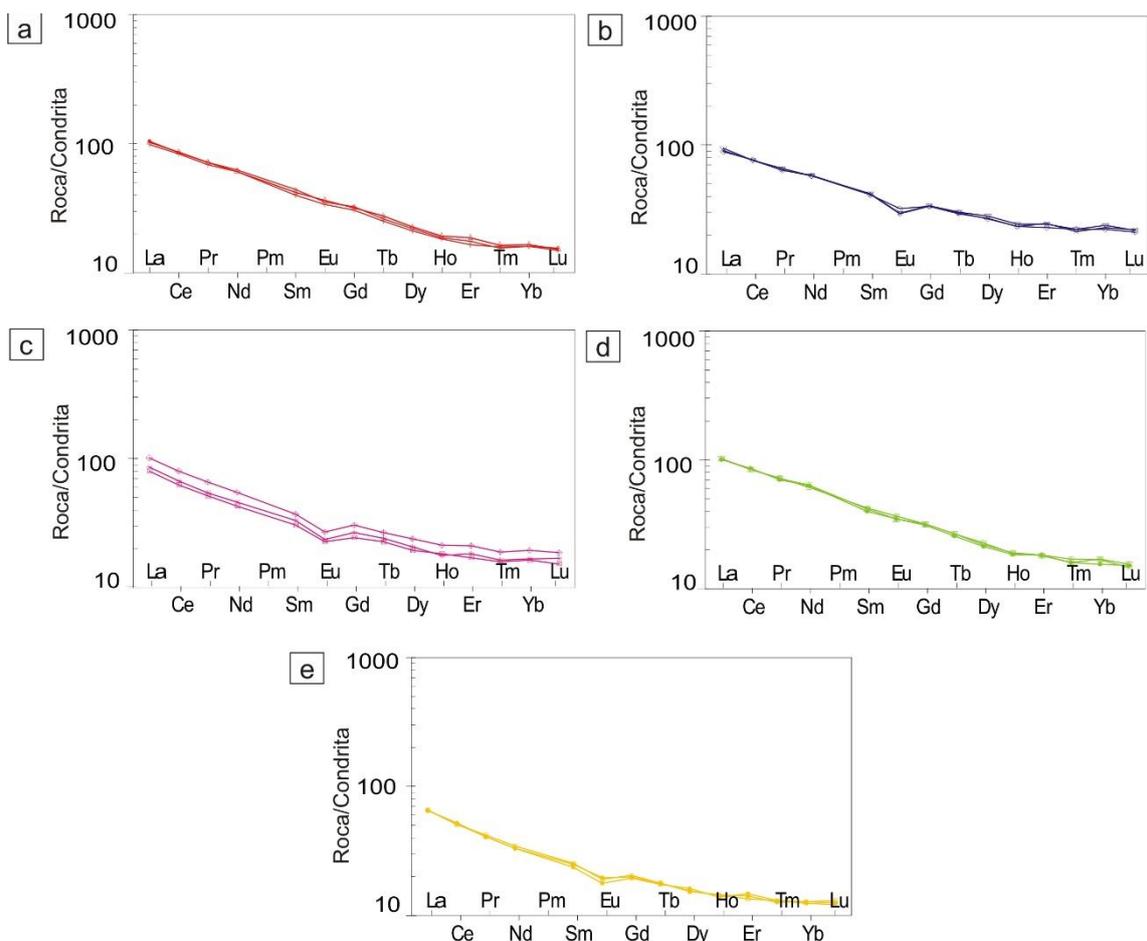


Figura 5.44. Diagramas de tierras raras (REE) normalizados a condritas (Boynton 1984). a. Cantera "L.A". b. Cantera "P.Y". c. Cantera "L.D". d. Cantera "L.M". e. Cantera "Y".

5.3 Clasificación de los basaltos en base a su composición química

La mayor parte de las coladas de lavas del Paraná pueden ser vistas como una secuencia homogénea de basaltos pero existen variaciones significativas de composición (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1981). Inicialmente el contenido de TiO_2 ha sido propuesto como un elemento discriminador de las rocas del Paraná (Bellieni *et al.*, 1984b), considerándose en función de su porcentaje: basaltos de bajo (< 2%, LTiB) o alto titanio (> 2%, HTiB), luego generalizado para todas las grandes provincias de derrames basálticos continentales mesozoicos del Gondwana.

En cuanto a la tipificación geoquímica, otros autores asignaron gran importancia a la relación Ti/Y junto al porcentaje de TiO_2 , como así también a los cocientes Ti/Zr, Zr/Y y

al contenido de Sr. Esto permitió distinguir seis variedades: Urubici, Pitanga, Paranapanema, Ribeira, Esmeralda y Gramado (Peate *et al.*, 1992, Peate, 1997). En base a estos criterios los tres primeros litotipos son considerados de alto Ti y los restantes de bajo Ti, pero es importante señalar que las variedades de bajo Ti pueden presentar hasta un 2,3% de TiO_2 mientras que las de alto Ti pueden incluir rocas con valores desde 1,7%. Debido a este solapamiento es que se definieron los términos transicionales o intermedios con valores de entre 2-3% TiO_2 .

De acuerdo a esta clasificación, las rocas estudiadas en el presente trabajo fueron clasificadas como de alto HTi ($\text{TiO}_2 > 3\%$) e intermedios ITi (TiO_2 2-3%). Las muestras analizadas presentan relaciones $\text{Ti/Y} > 310$ a excepción de la muestra "L.Ds" que se encuentra levemente por debajo de este límite (Figura 5.45). Según la relación Ti/Y vs. Ti/Zr las 5 canteras estarían representadas por basaltos HTi. Sin embargo utilizando los criterios Peate *et al.* (1992), Peate (1997), las canteras "L.D" y "Y" representarían la transición entre los HTi y los LTi.

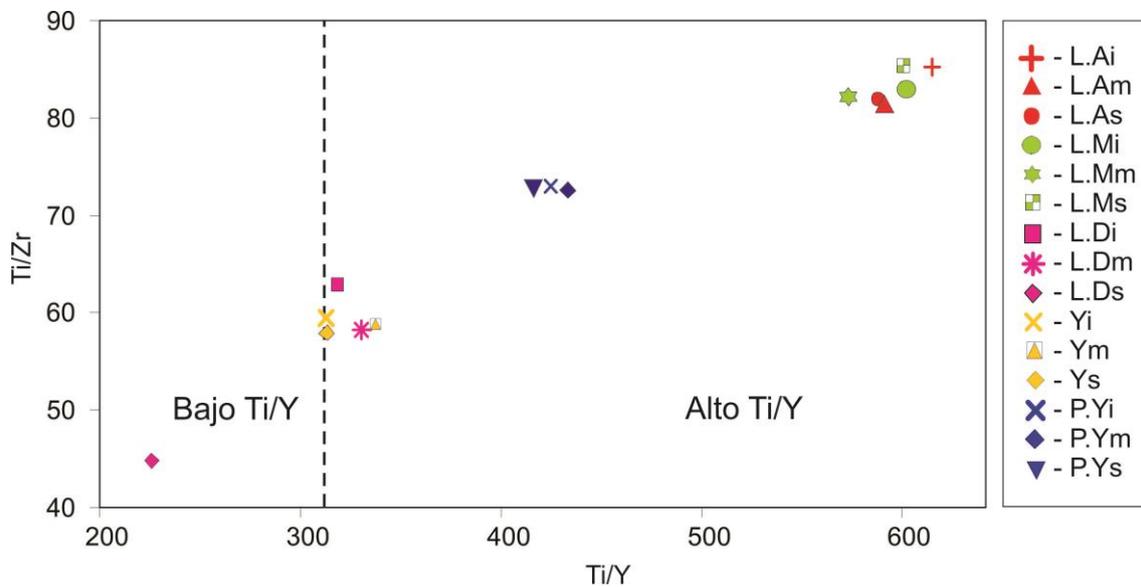


Figura 5.45. Diagrama Ti/Y vs. Ti/Zr según Peate (1997). La línea punteada indica la división entre los magmas tipo de bajo Ti/Y (Gramado, Esmeralda y Ribeira) y los magmas tipo de alto Ti/Y (Urubici, Pitanga y Paranapanema).

Las Canteras “L.A” y “L.M” registran valores de $\text{TiO}_2 \geq 3,5\%$ (Urubici/Pitanga); el Sr varía entre 421 y 445 ppm (Pitanga/Paranapanema). Las relaciones son $\text{Ti/Y} > 580$ (Urubici) para ambos casos; $\text{Ti/Zr} > 80$ (Pitanga/Paranapanema); y para $\text{Zr/Y} > 7$ (Urubici/Pitanga).

La cantera “P.Y” tiene valores de TiO_2 cercanos a 3,1% (Pitanga/Paranapanema); aunque el Sr varía entre 223ppm y 242ppm (Paranapanema/Ribera). Las relaciones Ti/Y son mayores a 417 (Pitanga/Paranapanema); las $\text{Ti/Zr} > 72$ (Pitanga/Paranapanema); y las $\text{Zr/Y} > 5,7$ (Pitanga/Paranapanema).

Las canteras “L.D” y “Y” registran los valores más bajos de TiO_2 , varían entre 1,3% y 1,9% (Ribera/Esmeralda); el Sr varía entre 215ppm y 286ppm (Paranapanema/Ribera). Las relaciones Ti/Y son >313 con un máximo de 389,4 (Ribera); la relación Ti/Zr presenta mínimos de 45 y valores máximos cercanos a 63 (Esmeralda?) y de $\text{Zr/Y} > 5$ (Paranapanema/Ribera). En la Figura 5.46 se grafican las muestras analizadas, discriminadas según los conceptos establecidos por Peate *et al.* (1992) en base a la relación TiO_2 (%) vs. Sr (ppm).

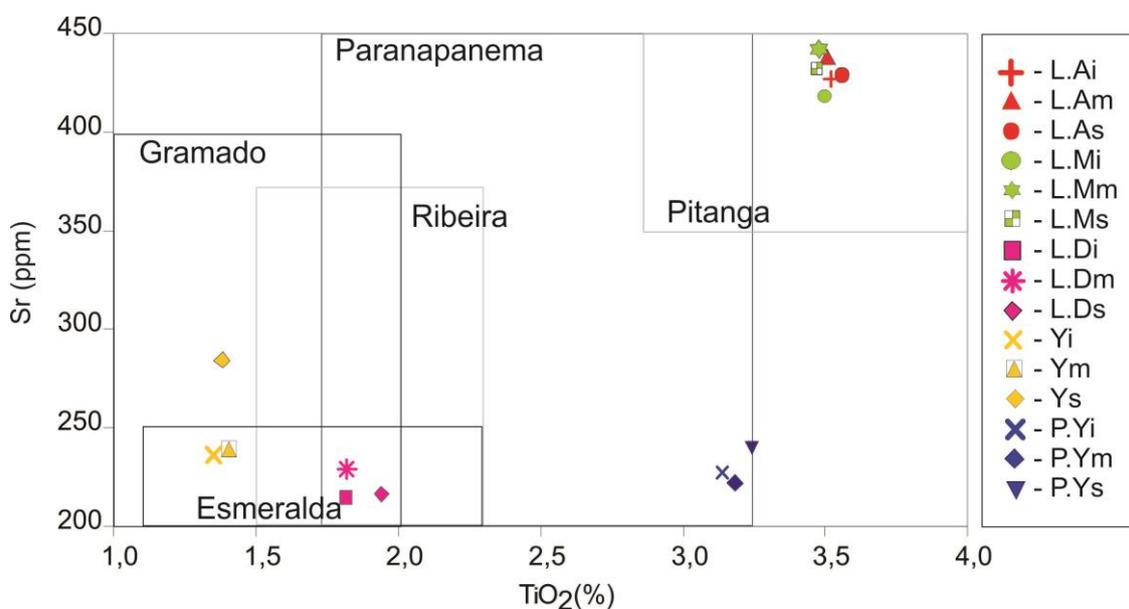
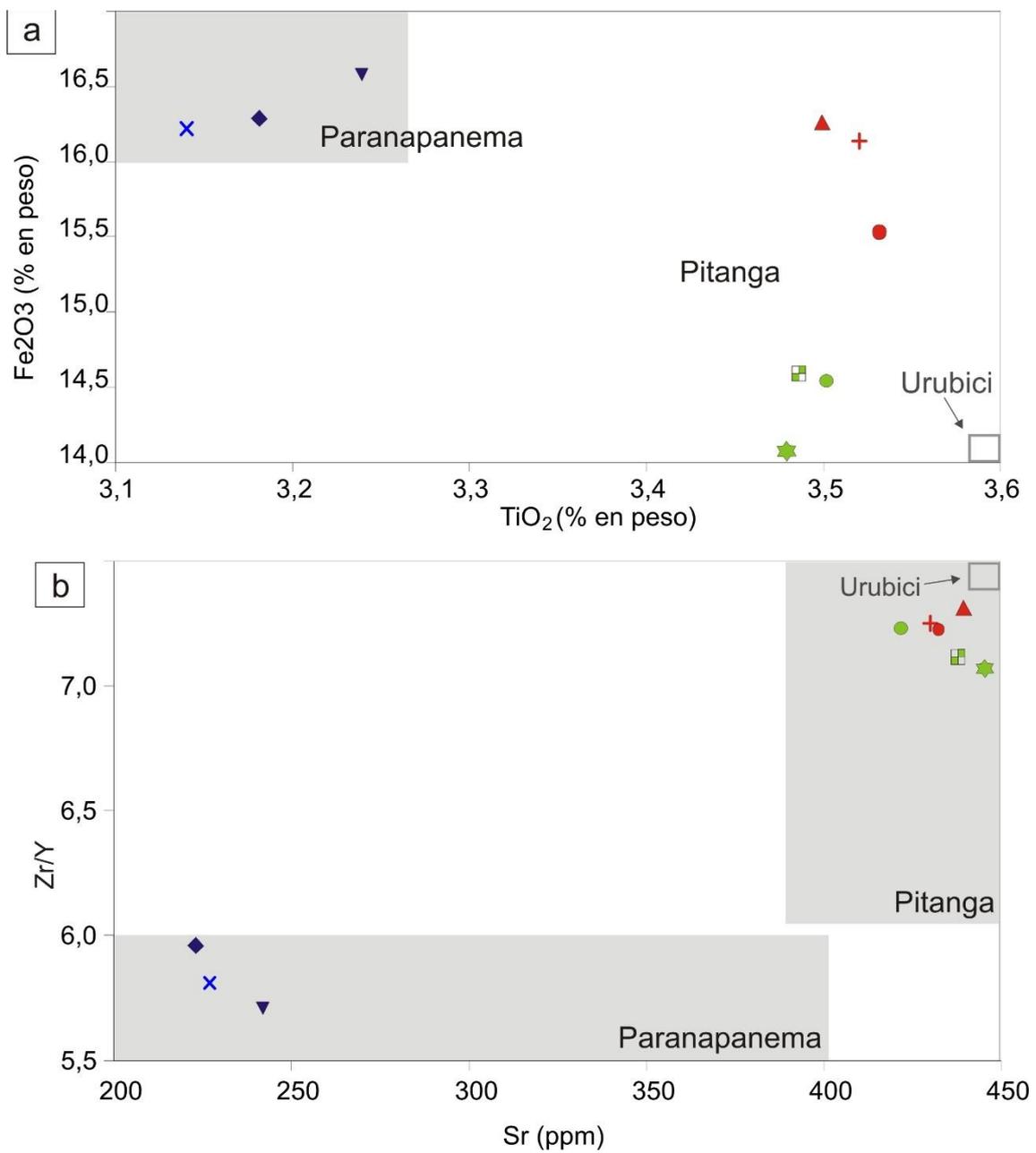


Figura 5.46. Diagrama TiO_2 vs. Sr de discriminación de magmas según Peate *et al.* (1992). El tipo Urubici no está incluido en la figura, debido a que este litotipo no fue registrado en las muestras analizadas.

La discriminación de los magmas considerados de rangos intermedios (ITi) es compleja. Aunque las muestras de Paranapanema se pueden distinguir en gran parte de Pitanga por su menor contenido de TiO_2 , existe un problema de superposición entre los dos tipos de magmas. La separación es más clara en el diagrama de Fe_2O_3 vs TiO_2 (Figura 5.47.a), lo que demuestra que el Paranapanema comparte el alto Fe_2O_3 al igual que Pitanga, respecto a Urubici. La diferencia se refleja en la baja relación Zr/Y y bajo contenido de Sr de los magmas tipo Paranapanema (Figura 5.47.b). Se graficaron las canteras: "L.A", "L.M" (litotipo Pitanga) y "P.Y" (litotipo Paranapanema), considerados todos como magmas de alto Ti. Se señala donde quedaría ubicado el campo de los magmas tipo Urubici, el cual no está representado en el rango de los valores expresados en la figura.

Para los magmas de tipo Esmeralda las relaciones tales como Zr/Y son generalmente más bajas, respecto a Gramado. Sin embargo el discriminante más claro entre los dos grupos es la relación Ti/Zr . Esmeralda presenta valores de $\text{Ti}/\text{Zr} > 60$, mientras Gramado tiene $\text{Ti}/\text{Zr} < 70$ (Figura 5.48.a). Las muestras de Ribera comparten muchas características geoquímicas con Esmeralda, haciendo más compleja su diferenciación. Existen diferencias importantes tales como valores de $\text{Sr} > 250$ y relaciones $\text{Ti}/\text{Y} > 300$ y $\text{Zr}/\text{Y} > 5$, que permiten clasificarlos (Figura 5.48.b).

Figura 5.47. Diagramas de variación para magmas tipo HTi. a. Fe₂O₃ vs TiO₂. b. Sr vs. Zr/Y.

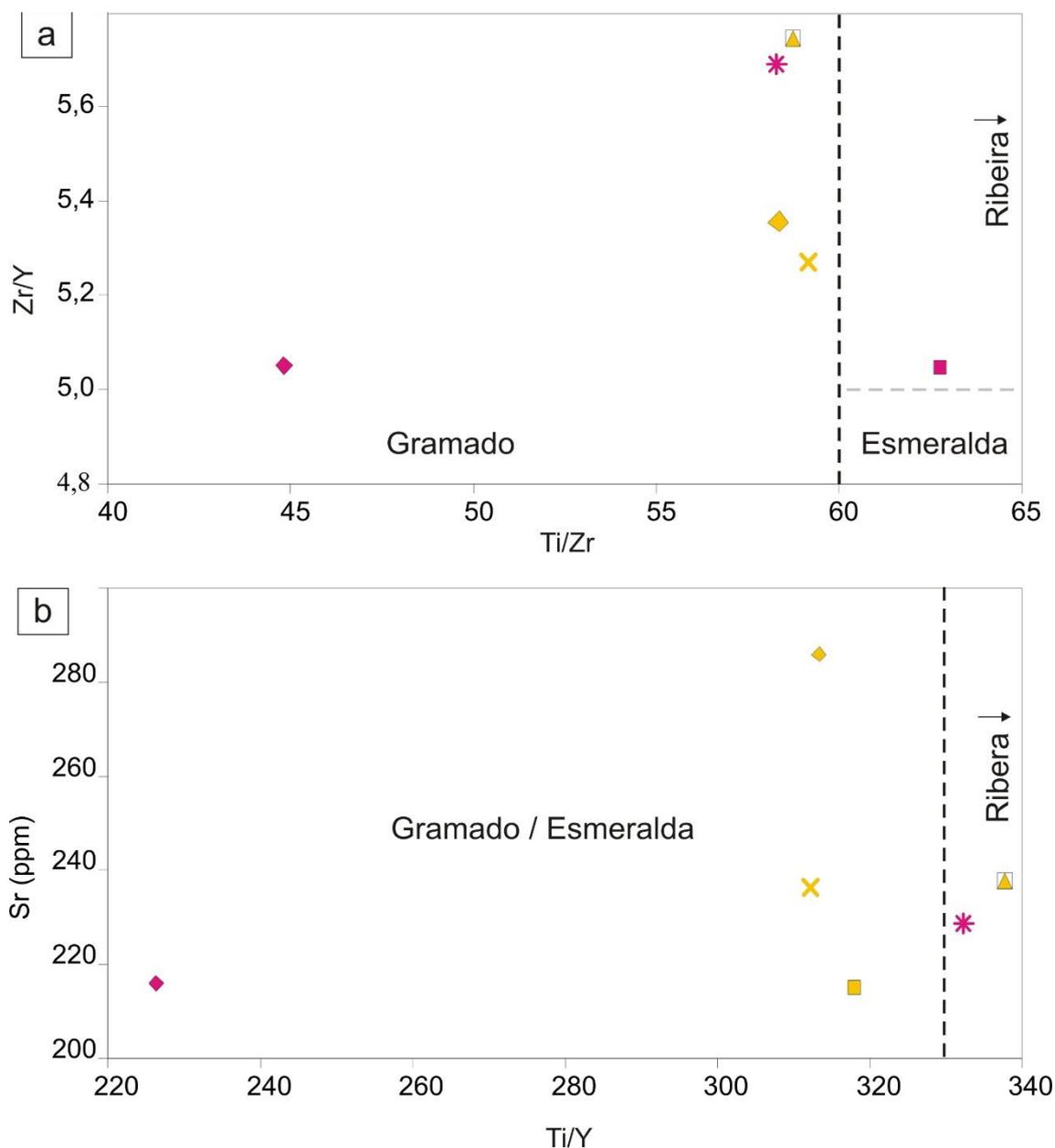


Figura 5.48. Diagramas de variación para magmas tipo LTi. a. Ti/Zr vs. Zr/Y. b. Ti/Y vs Sr. Se graficaron las canteras “L.D” y “Y” clasificadas como magmas de bajo Ti.

A partir del contenido de elementos traza y de las características isotópicas, Peate *et al.* (1992) y Peate (1997), separaron los tipos de magma en dos grupos. Estos autores utilizaron la relación $Ti/Y < 310$ según el criterio de Hergt *et al.* (1991) para distinguir a los magmas Gramado y Esmeralda ($Ti/Y < 310$) de Paranapanema y Ribeira (>310), que si bien presentan algunos valores similares de Ti, tienen otras características composicionales que los relacionan con las variedades de alto Ti (Pitanga y Urubici)

(Peate, 1997). Los magmas del grupo Gramado y Esmeralda se caracterizan por presentar valores algo empobrecidos en Nb y Ta con respecto al La (Nb/La 0,5-0,8) (Peate *et al.*, 1990). Peate *et al.* (1992) distinguieron estos magmas en el sur de Brasil e interpretaron al tipo Esmeralda como una unidad más joven que se presenta superpuesta a los magmas Gramado.

Los otros tres tipos, Ribeira, Paranapanema y Pitanga, tienen patrones similares de elementos traza, normalizados al manto primordial. De acuerdo a Peate *et al.* (1992), estos tres magmas se encuentran espacialmente asociados, son dominantes en el norte de la provincia y sus manifestaciones podrían llegar tan al sur como el norte de Argentina (Peate, 1997).

En diagramas multielementales normalizados a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), las rocas de alto Ti presentan, en términos generales, mayores contenidos de elementos traza, y se ponen de manifiesto en ambos casos las anomalías negativas en Nb-Ta, Sr, P y Ti (Figura 5.49a). Los litotipos definidos para los basaltos relevados, coinciden con las tendencias de distribución de titanio según Lagorio y Vizán (2011) con un marcado enriquecimiento en elementos de alto radio iónico (LILE) por sobre los de alta carga iónica (HFSE) y tierras raras livianas (LREE) diferenciándose las canteras "L.A", "P.Y" y "Y", con valores generales más enriquecidos (Alto Ti) respecto a las muestras de "L.D" y "Y" (Bajo Ti) (Figura 5.49.b).

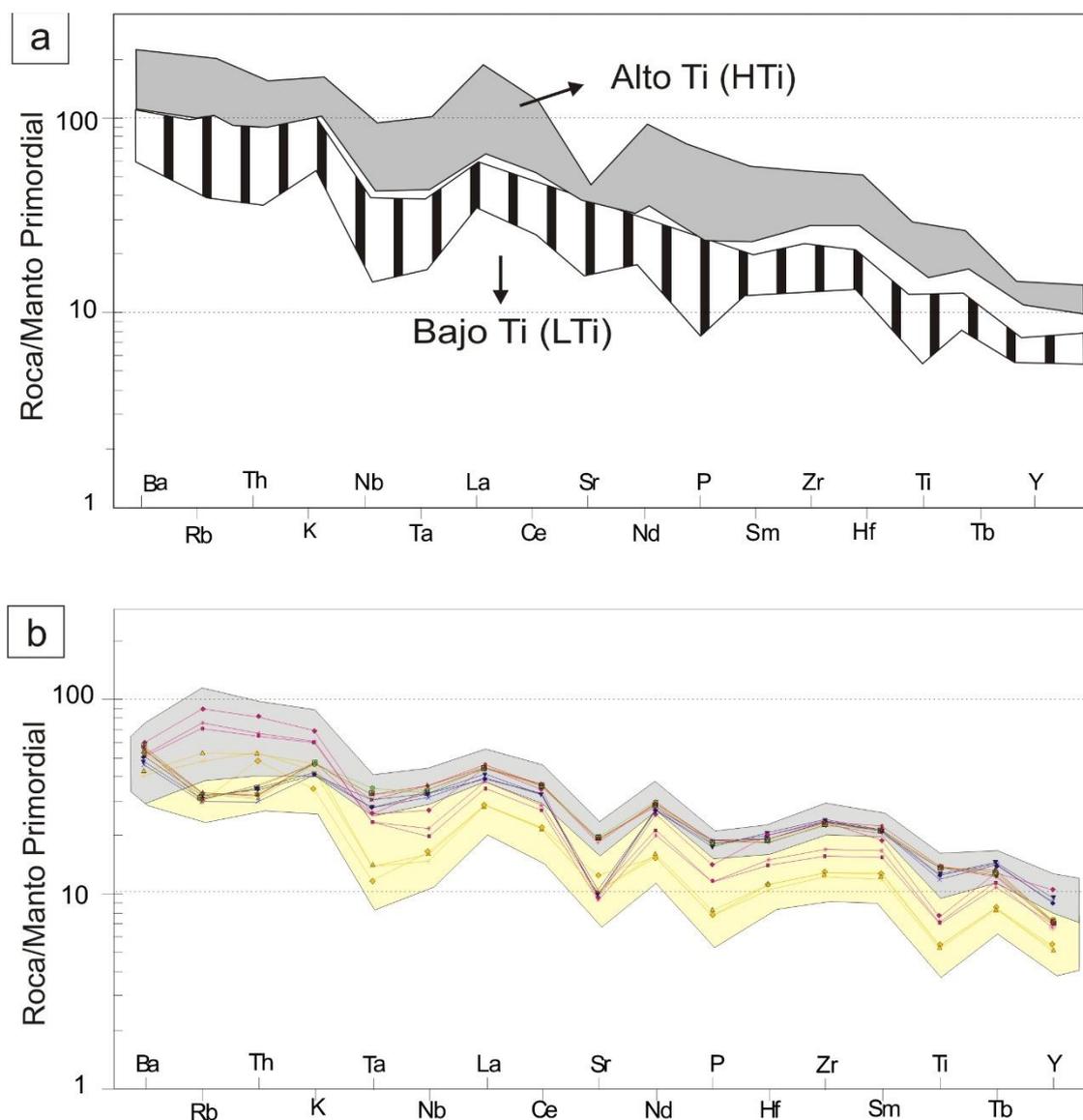


Figura 5.49. Diagramas multielementales normalizados a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). a. patrones de distribución según el titanio (Tomado de Lagorio y Vizán 2011). b.

Canteras relevadas de las Prov. de Corrientes y Entre Ríos.

5.4 Minerales de alteración

En esta sección se analizó una muestra perteneciente a la cantera "Y", que corresponde al piso del yacimiento donde se observa un nivel vesicular expuesto (Figura 5.50a), con abundantes cavidades rellenas de minerales de alteración. Es de color pardo rojizo y presenta un avanzado grado de alteración (Figura 5.50b).

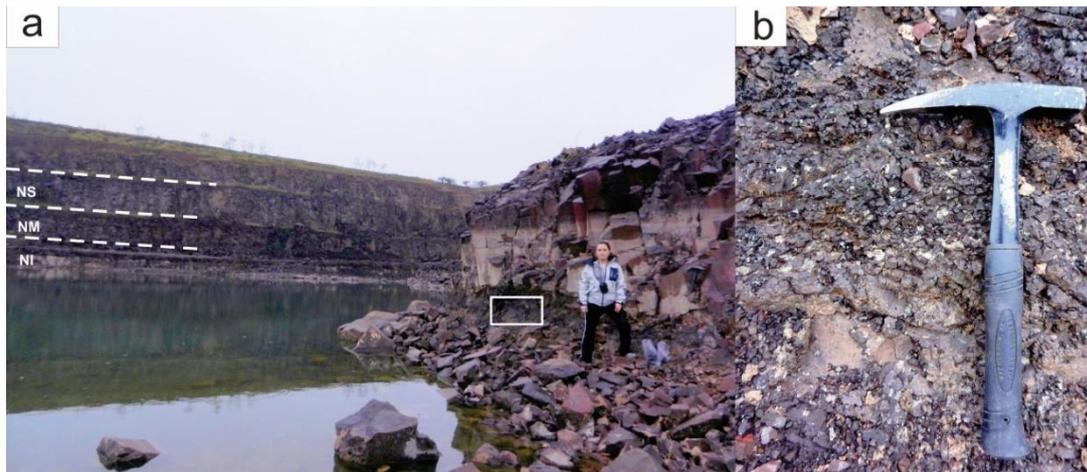


Figura 5.50. a. Vista de la cantera desde el nivel inferior. b. Detalle del basalto vesicular.

Las amígdalas representan el 50% del total de la roca y en ocasiones están parcial o totalmente rellenas con, por lo menos, dos tipos de materiales de grano fino, uno verdoso que suele localizarse en las zonas de borde, y otro blanquecino localizado en el interior de las mismas (Figura 5.51a y b). Con estereomicroscopio se observan venillas de calcita en el borde de la cavidad y rellenando fisuras (Figura 5.51c y d).

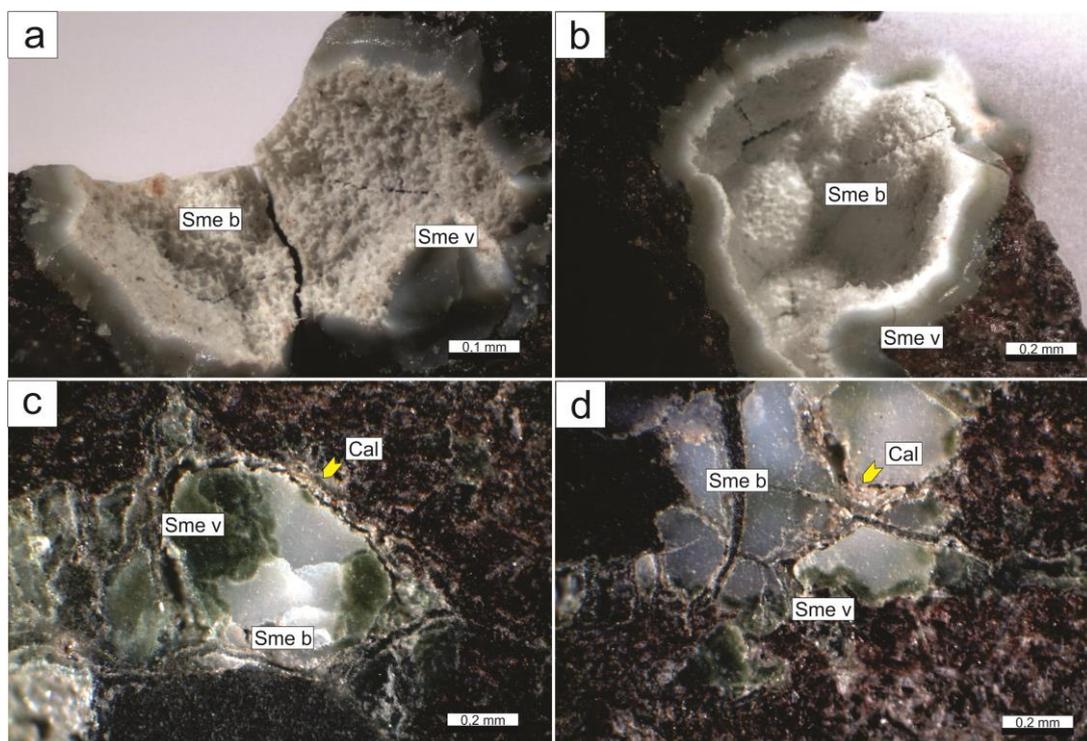


Figura 5.51. vesículas vistas bajo estereomicroscopio donde se observa: esmectita verde (Sme v), esmectita blanca (Sme b) y calcita en bordes y venillas.

Vista al microscopio óptico la roca posee textura intersertal, con tablillas desorientadas de plagioclasa ($\sim 100\mu\text{m}$) muy argilizadas, contenidas en una mesostasis de minerales arcillosos, óxidos/hidróxidos de hierro (\pm titanio), vidrio volcánico relíctico y cristales aciculares de apatito. Además, se reconocen clinopiroxenos fracturados y alterados a óxidos de hierro (\pm titanio) (Figura 5.52).

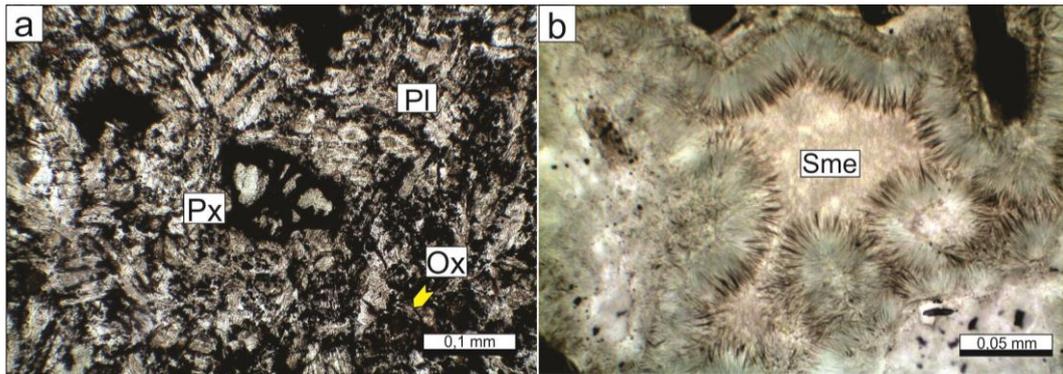


Figura 5.52. a. Plagioclasa intensamente alterada y augita, asociada a óxidos/hidróxidos de hierro. b. Imagen de detalle de una vesícula con desarrollo de arcillas esmectíticas.

Mediante DRX se identificó esmectita como fase dominante con su típica reflexión a $\sim 15,2\text{\AA}$ que expande a $\sim 17\text{\AA}$ por glicolado y colapsa a $\sim 10\text{\AA}$ luego del calcinado, y calcita como fase secundaria con su principal reflexión en $3,02\text{\AA}$ (Figura 5.53).

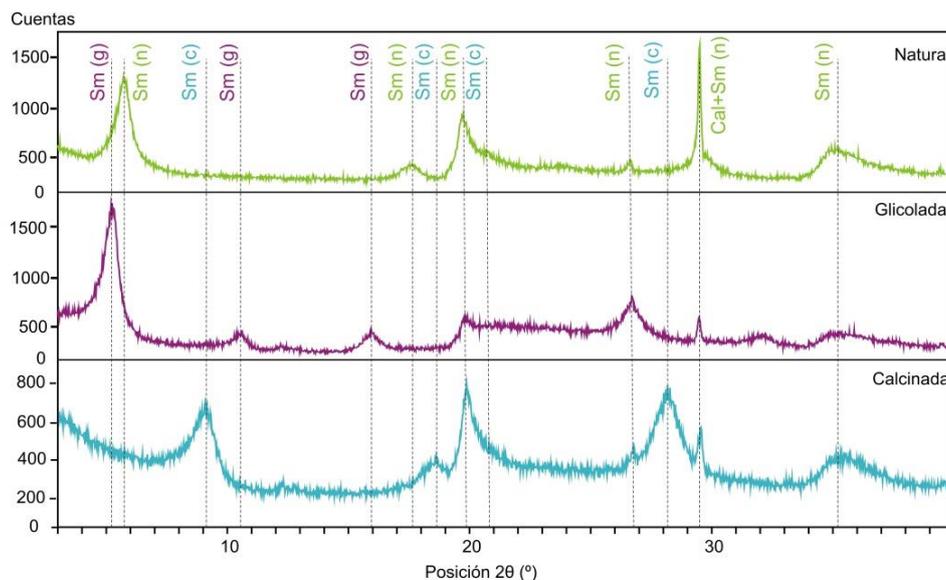


Figura 5.53. DRX de la muestra orientada secada al aire (a.1), con etilenglicol (a.2) y calcinada a 500° (a.3).

El material arcilloso fue analizado mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, y microanálisis con sonda de electrones. A nivel microscópico la esmectita verdosa presenta hábito laminar a fibroso de grano fino ($\leq 20\mu\text{m}$) formando abanicos (Figura 5.54a). La esmectita blanquecina tiene textura en “honeycomb”, con pequeñas láminas ($\sim 500\text{nm}$) agrupadas formando paquetes plegados (Figura 5.54b).

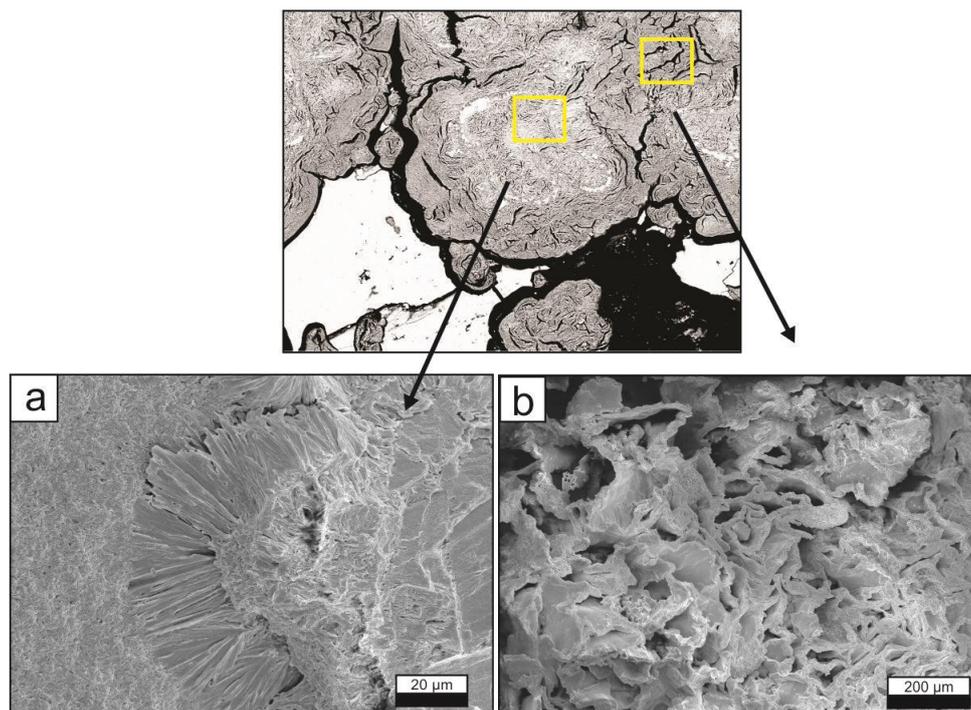


Figura 5.54. Imágenes de electrones secundarios (SEM) a. Esmectita de variedad fibrosa. b. Esmectita blanquecina tiene textura en “honeycomb”.

Químicamente la esmectita verdosa (Figura 5.55a) presenta mayores contenidos de Mg y Fe, y menores de Al y Si, respecto de la blanquecina. Estas diferencias son más marcadas en el Mg y el Al (Figura 5.55b y c). A partir de los análisis de química mineral, se proyectaron las proporciones elementales de los sitios octaédricos en un diagrama ternario Al-Mg-Fe (Figura 5.55d). La esmectita verdosa se asocia al campo de la saponita (trioctaédrica), mientras que la blanquecina lo hace al de la serie beidellita-montmorillonita (dioctaédricas). Se consideró todo el hierro como Fe^{3+} para la serie beidellita-montmorillonita y una relación de Fe^{3+}/Fe total: 0,4 para las saponitas (Velde 1992). El Mg se asumió como ocupando el sitio octaédrico.

Las esmectitas blanquecinas se ubicarían en un campo intermedio entre beidellita y montmorillonita, con mayor tendencia hacia beidellita (Meunier, 2003, Figura 5.55.e). La asociación beidellita-saponita podría asociarse con ambientes hidrotermales naturales (Beaufort *et al.*, 1995), y la transición montmorillonita-beidellita a mezcla de fluidos geotermales y aguas meteóricas (Guisseau *et al.*, 2007).

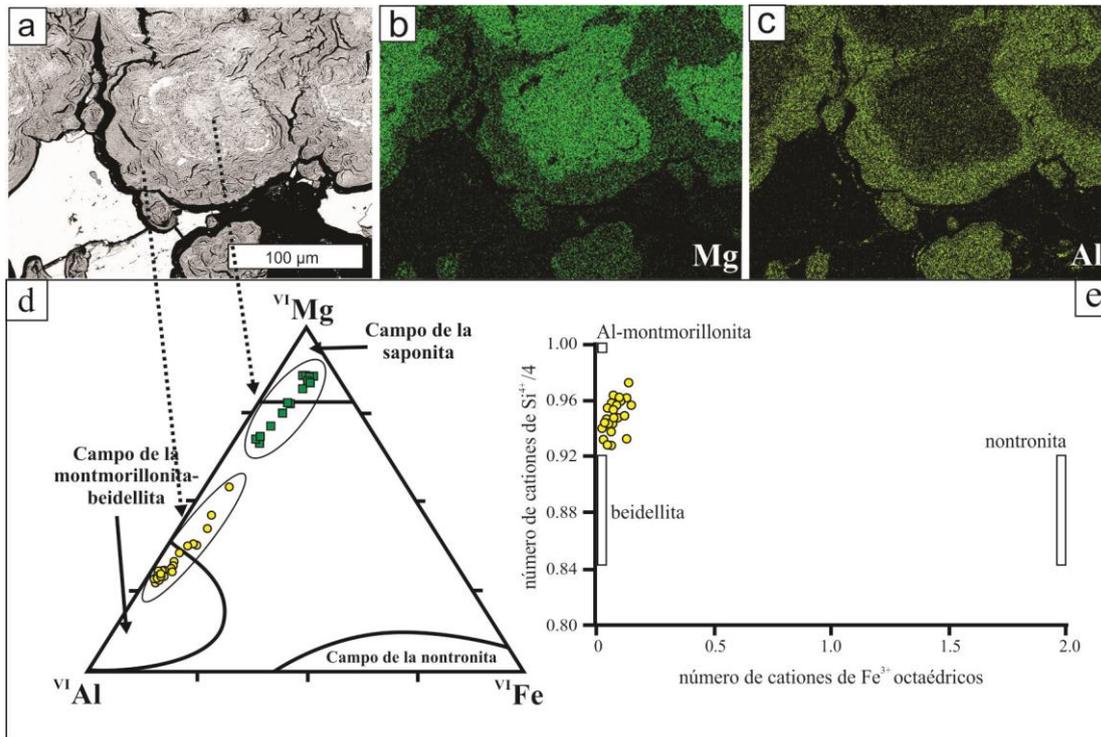


Figura 5.55. a. Imagen de electrones retrodispersados. b y c. mapas composicionales de Mg y Al respectivamente, del mismo sector (SEM). d. Diagrama ternario Mg-Al-Fe (octaédrico) según Iacoviello *et al.* (2012). e. Diagrama número de cationes de Fe^{3+} vs. núm. de cationes de $Si^{4+}/4$ (Meunier, 2003).

5.5 Consideraciones finales

Las canteras relevadas presentan variaciones tanto en su mineralogía y textura, como en su impronta geoquímica, mostrando una relación en cuanto a su ubicación geográfica. De acuerdo a la clasificación en base a elementos mayoritarios las rocas pertenecen a basaltos de carácter toleítico, de tipo continental ricos en hierro. En el diagrama de clasificación TAS, las muestras de las canteras "L.D" y "Y" se desplazan hacia el límite intermedio, basalto andesítico, con valores de SiO₂ mayores. En base al análisis de los elementos traza las rocas, se ubican en su mayoría dentro del campo de basaltos alcalinos de intraplaca (WPT), sólo las muestras de las canteras "L.D" y "Y" se ubican en el campo de basaltos calco-alcalinos (CAB). Esta variación en la geoquímica es atribuible a los procesos de alteración que han sufrido las rocas.

Las canteras "L.A" y "L.M", localizadas muy próximas entre sí, son muy homogéneas petrográficamente y registran valores de TiO₂ ≥ 3,5% (magma tipo Urubici/Pitanga). Las canteras "L.D" y "Y" se ubican cercanas a la localidad de Yofre. Si bien el tamaño de grano es levemente distinto, en ambas se identificó sanidina en los interespacios cristalinos y el intercrecimiento con cuarzo microgranular, dando lugar a la formación de texturas poquilíticas y micrográficas. Ambas registran los valores más bajos de TiO₂, que varían entre 1,3% y 1,9% (magma tipo Ribera/Esmeralda). La roca de la cantera "P.Y" ubicada en la provincia de Entre Ríos, es la de mayor tamaño de grano, la que presenta mayor alteración y variación textural. Los valores de TiO₂ son cercanos a 3,1% (magma tipo Pitanga/Paranapanema).

Los minerales de alteración del basalto vesicular identificado en la parte inferior de la cantera "Y" son esmectitas. Se determinaron dos tipos, una verdosa localizada en las zonas de borde y hábito laminar a fibroso de grano fino y otra blanquecina en el interior de las mismas, con textura en "honeycomb". La química mineral ubicó a la primera en el campo de la saponita (trioctaédrica), mientras que la blanquecina se asocia a la serie beidellitmontmorillonita (dioctaédricas).

CAPÍTULO 6

RESULTADOS. Reactividad Alcalina Potencial de las Rocas Estudiadas.

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos normalizados realizados para evaluar la reactividad alcalina potencial de las rocas estudiadas, junto con otros métodos no convencionales para determinar su comportamiento frente a la RAS.

El análisis petrográfico se realizó sobre el material triturado 6mm-20mm muestreado en los acopios. El cemento utilizado en todos los casos fue un cemento portland normal (CPN 40).

6.1 Examen petrográfico

6.1.1 IRAM 1649 (2008)

6.1.1.1 Cantera "L.A"

La roca está constituida por tablillas subhedrales de plagioclasa de composición An_{38-40} , con bordes cristalinos irregulares corroídos, con tamaños de grano que varían entre $200\mu m$ y $350\mu m$. El mafito es augita y augita titanífera que se aloja en los interespacios que deja el feldespató (Figura 6.1a). Son abundantes los minerales opacos, principalmente hematita. Tanto las plagioclasas como los mafitos se presentan levemente alterados. La textura de la roca es intersertal. Son frecuentes los autolitos de textura granular, de mayor desarrollo cristalino que el resto de la roca (1,5mm-3mm), constituidos por andesina-labradorita con grandes cristales de piroxenos (augita), con escasa alteración y evidencias de asimilación periférica (Figura 6.1b). En los espacios intercristalinos se reconocen sectores aún isótropos, de colores pardos, considerados relictos de la palagonita original, y minerales de alteración que se generan a partir de la degradación del vidrio volcánico, constituidos por arcillas esmectíticas. Estos últimos fueron confirmados por DRX para lo cual se separó a arcilla por el método de cilindrobureta (Figura 6.2). Es común la presencia, en cantidades subordinadas, de clorita, apatito y óxidos de hierro (Figura 6.1c y d). La roca es un basalto toleítico.

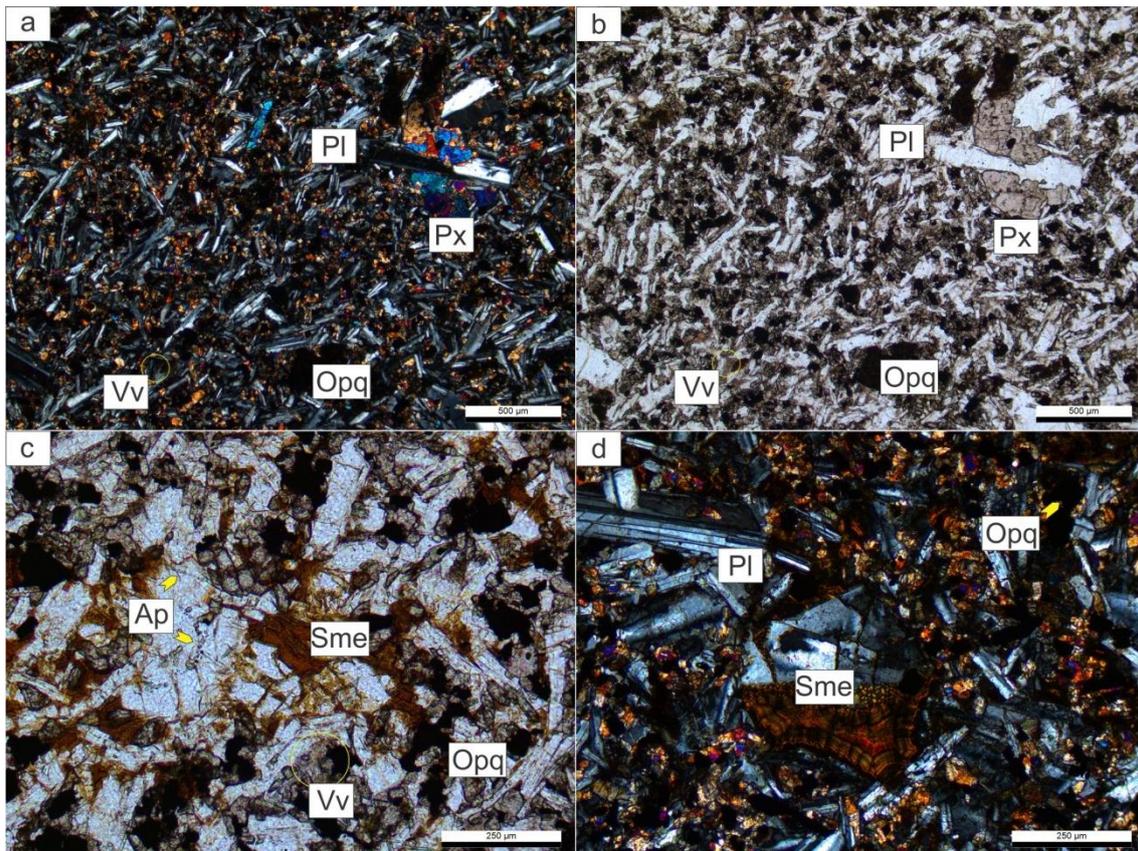


Figura 6.1. a y b. Tablillas de plagioclasa con augita y augita titanífera en los espacios intercrystalinos. Abundante contenido de minerales opacos, se observan autolitos de textura granular. c. En los espacios intercrystalinos se reconocen sectores isótropos, considerados relictos de la palagonita original. d. Vidrio relíctico, arcillas esmectíticas, clorita, apatito y óxidos de hierro. a y d: Nicoles cruzados. b y c: Luz paralela.

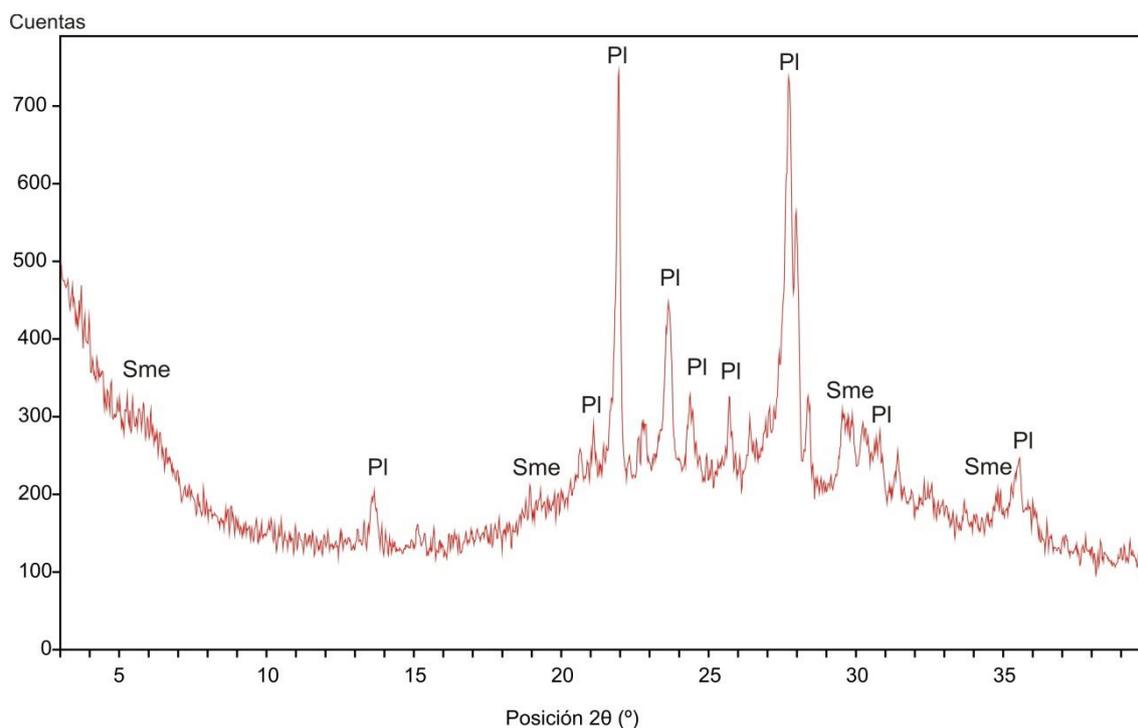


Figura 6.2. DRX del material arcilloso de la muestra "L.A."

6.1.1.2 Cantera "L.M"

La roca está constituida por una asociación mineralógica de grano fino, con textura intersertal a intergranular, compuesta por tablillas subhedrales de plagioclasa (An_{34-40}), que se presentan fracturadas, con bordes corroídos y maclados, cuyos tamaños varían entre $150\mu m$ - $300\mu m$. Es frecuente que estos fenocristales estén parcialmente albitizados. En los espacios intercrystalinos se disponen clinopiroxenos (augita titanífera), parcialmente desferrizados (óxidos/hidróxidos de hierro), asociados a minerales opacos (Figura 6.3a y b). Algunos sectores presentan minerales opacos y apatito, estos últimos dispuestos en finas agujas. La pasta es parcialmente vítrea, conservando sus características isotrópicas. Los procesos de alteración, especialmente aquellos que afectaron al vidrio volcánico, generaron minerales arcillosos del tipo esmectita, que además se emplazan en las microfisuras de los minerales primarios (Figura 6.3c y d). Estos minerales fueron confirmados por DRX (Figura 6.4). Se observaron autolitos de una roca de composición similar, mayor desarrollo cristalino (hasta 2mm) y textura microgranular, compuestos por individuos de plagioclasa, clinopiroxenos y minerales opacos (Figura 6.3a), ocasionalmente estos sectores son

monominerales. Los bordes evidencian asimilación periférica de la pasta (Figura 6.3b). La roca es un basalto toleítico.

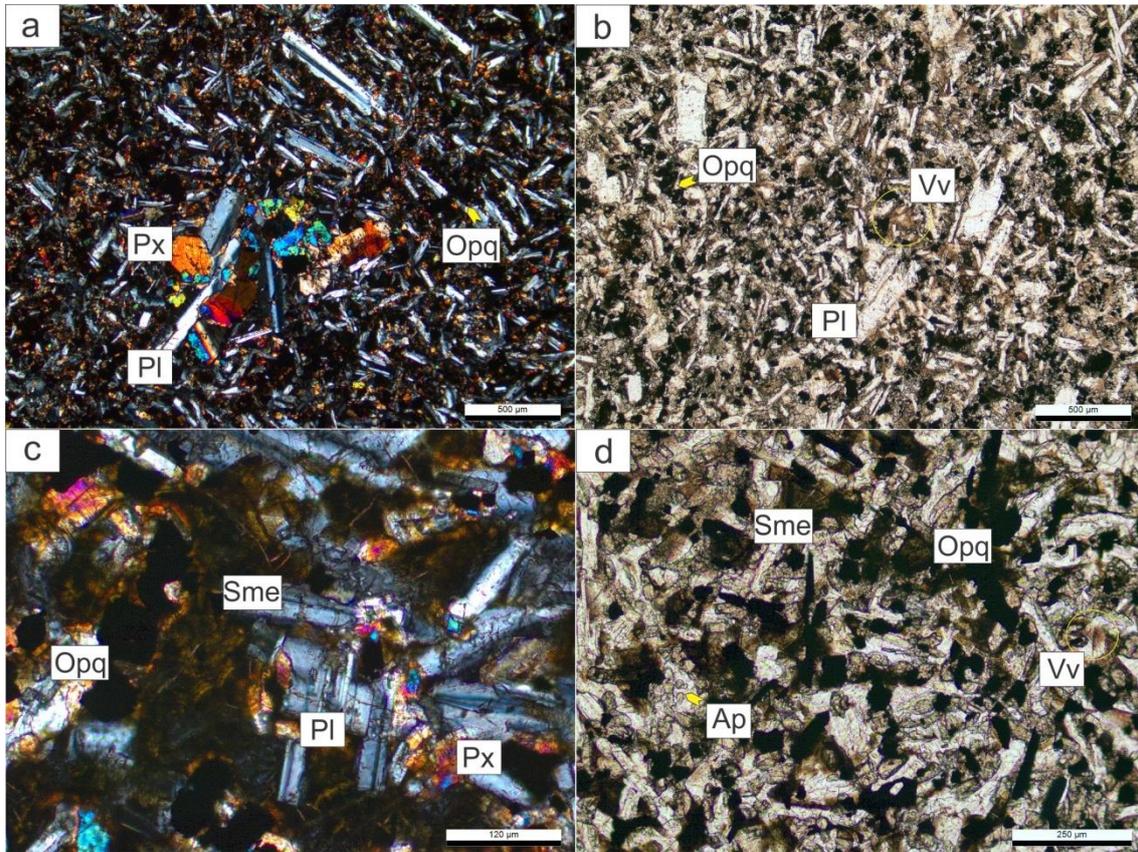


Figura 6.3. a. Textura intersertal en sectores intergranular, compuesta por tablillas subhedrales de plagioclasa con clinopiroxenos parcialmente desferrizados y minerales opacos. Se observan autolitos de una roca de composición similar y mayor desarrollo cristalino. b. Sectores con plagioclasa de mayor desarrollo cristalino. c. Abundante contenido de minerales arcillosos y presencia de minerales opacos d. Sectores con minerales opacos, agujas de apatito, minerales arcillosos del tipo esmectita y vidrio volcánico relíctico.

a y c: Nicoles cruzados. b y d: Luz paralela.

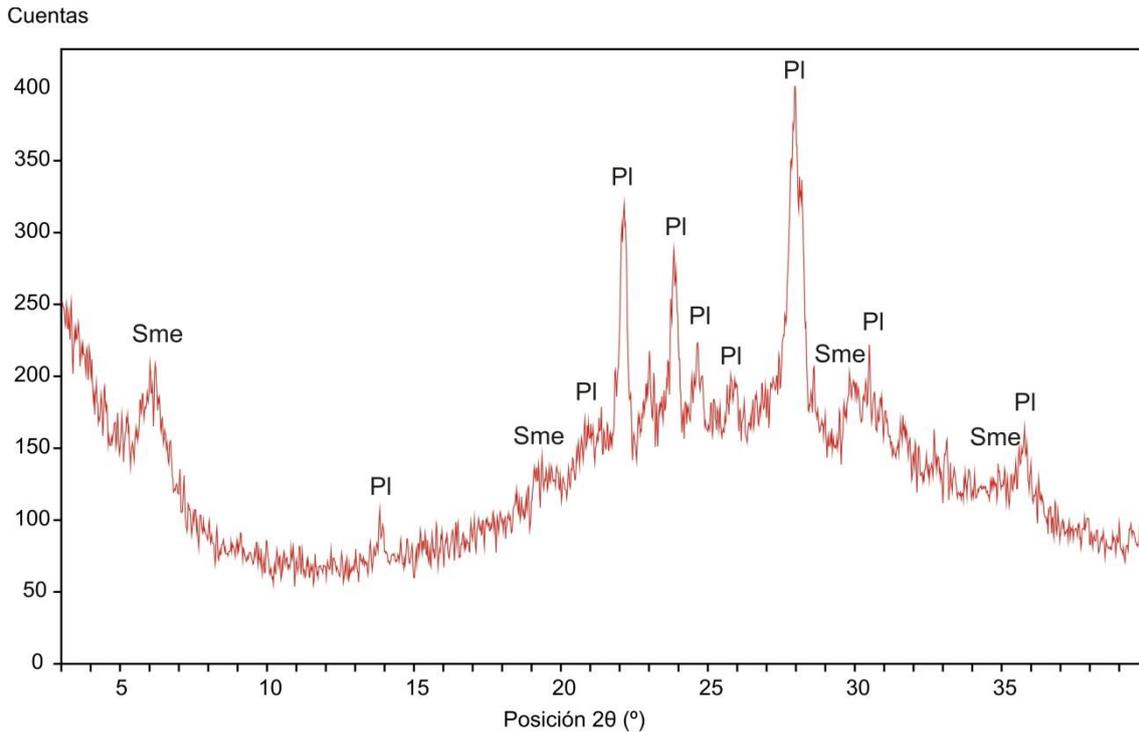


Figura 6.4. DRX del material arcilloso de la muestra "L.M."

6.1.1.3 Cantera "L.D"

La roca es microgranular, está constituida por tablillas de plagioclasa (An_{30-34}) con marcada corrosión en sus bordes y sericitización. El tamaño varía entre $300\mu m$ - $500\mu m$. El mineral máfico, de menor tamaño cristalino, es augita/augita titanífera relacionado a la presencia de óxidos/hidróxidos de hierro. Son comunes los minerales opacos y apatito de forma acicular (Figura 6.5a y b). Se reconocen individuos de sanidina frescos en los interespacios dejados por las plagioclasas, en ocasiones asociados con cuarzo microcristalino ($<62\mu m$) dando lugar a la formación de texturas poiquiliticas y micrográficas (Figura 6.5c). También se identificó cuarzo asociado con adularia (Figura 6.5d) y calcita. Se identificaron arcillas determinadas por DRX como esmectitas (Figura 6.6). No se reconocen autolitos. La roca califica como un basalto andesítico.

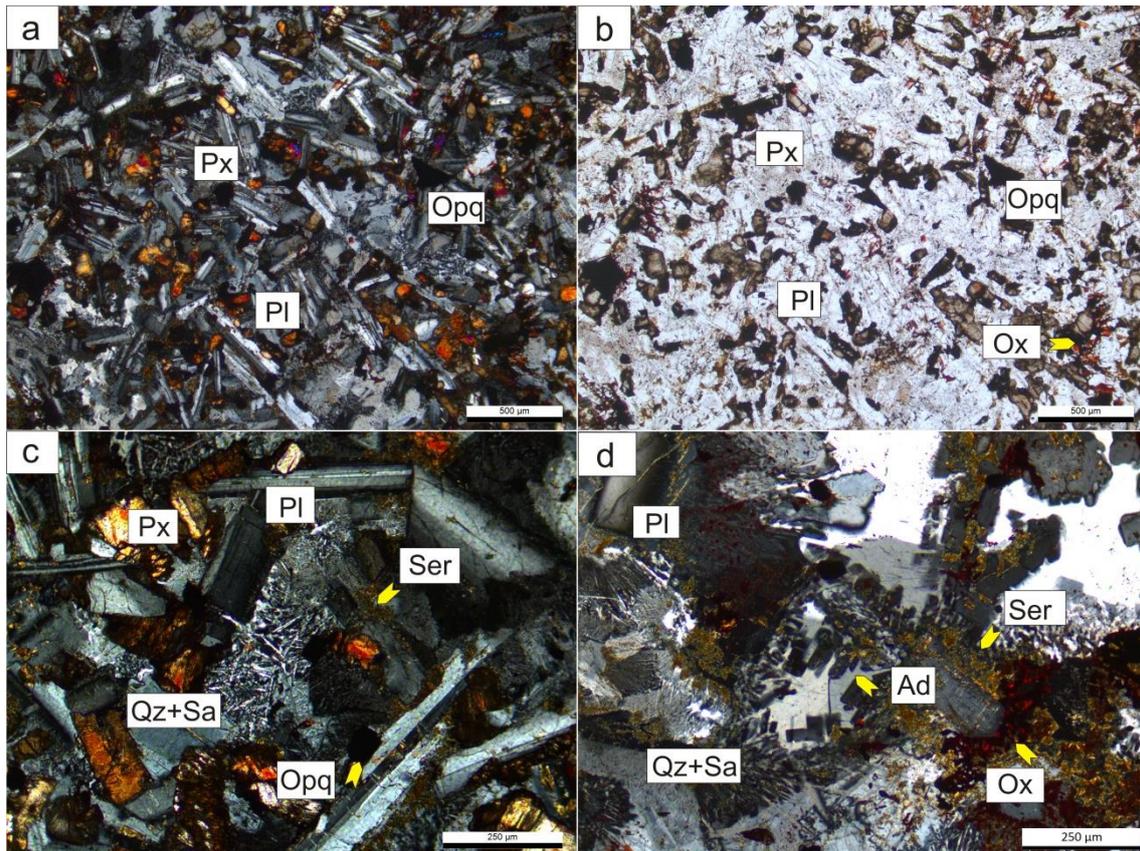


Figura 6.5. a y b. Textura microgranular, constituida por tablillas de plagioclasa, augita/augita titanífera con óxidos de hierro, minerales opacos y apatito. c. Sanidina con cuarzo microcristalino desarrollando texturas poiquilíticas y micrográficas. d. Cuarzo y sanidina con adularia. Se reconoce sericita alterando al feldespato. a, c y d: Nícoles cruzado. b: Luz paralela.

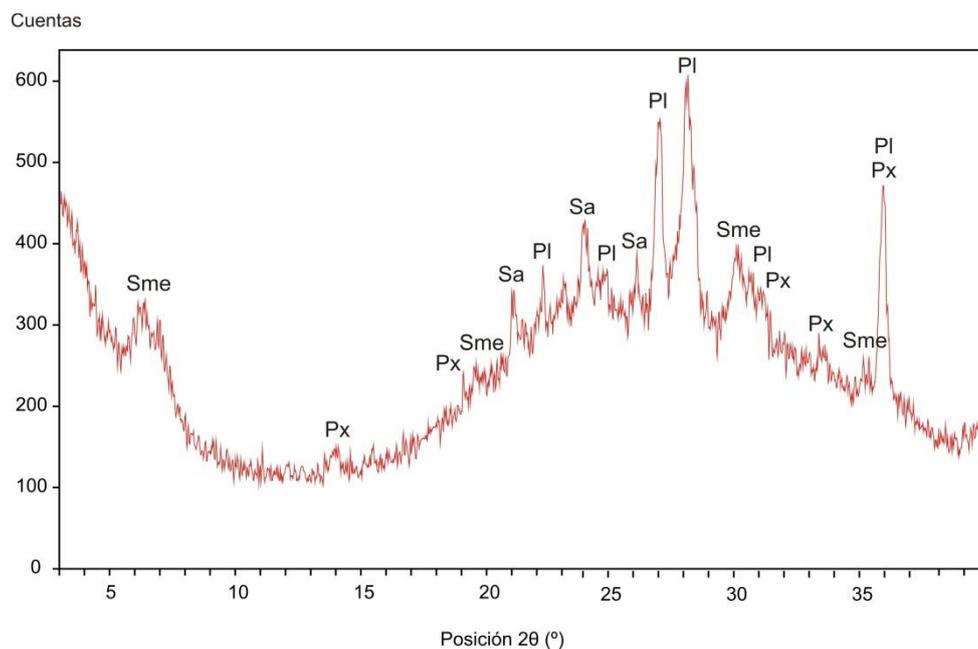


Figura 6.6. DRX del material arcilloso de la muestra "L.D."

6.1.1.4 Cantera "Y"

La roca está constituida por plagioclasas (An_{35-40}) fuertemente corroídas y fracturadas. El tamaño de las tablillas oscila entre $15\mu m$ y $80\mu m$. El mafito (de dimensiones similares al feldespato) es augita al que se asocia augita titanífera alterada diferencialmente, comúnmente desferrizada y cloritizada (Figura 6.7a y b). Estos procesos generan abundantes minerales opacos. Se reconocen sectores vítreos con procesos de desvitrificación de grado muy variable, desde zonas con vidrio relíctico a totalmente desvitrificado (Figura 6.7c y d) desarrollando zonas ricas en arcilla determinada por DRX como esmectita (Figura 6.8). La textura de la roca es intergranular. Esporádicamente aparecen cristales de feldespato y augita de tamaño superiora $1mm$, con bordes corroídos y fracturados incluyendo en su masa a los minerales de la roca (Figura 6.7a y b). La roca es un basalto andesítico.

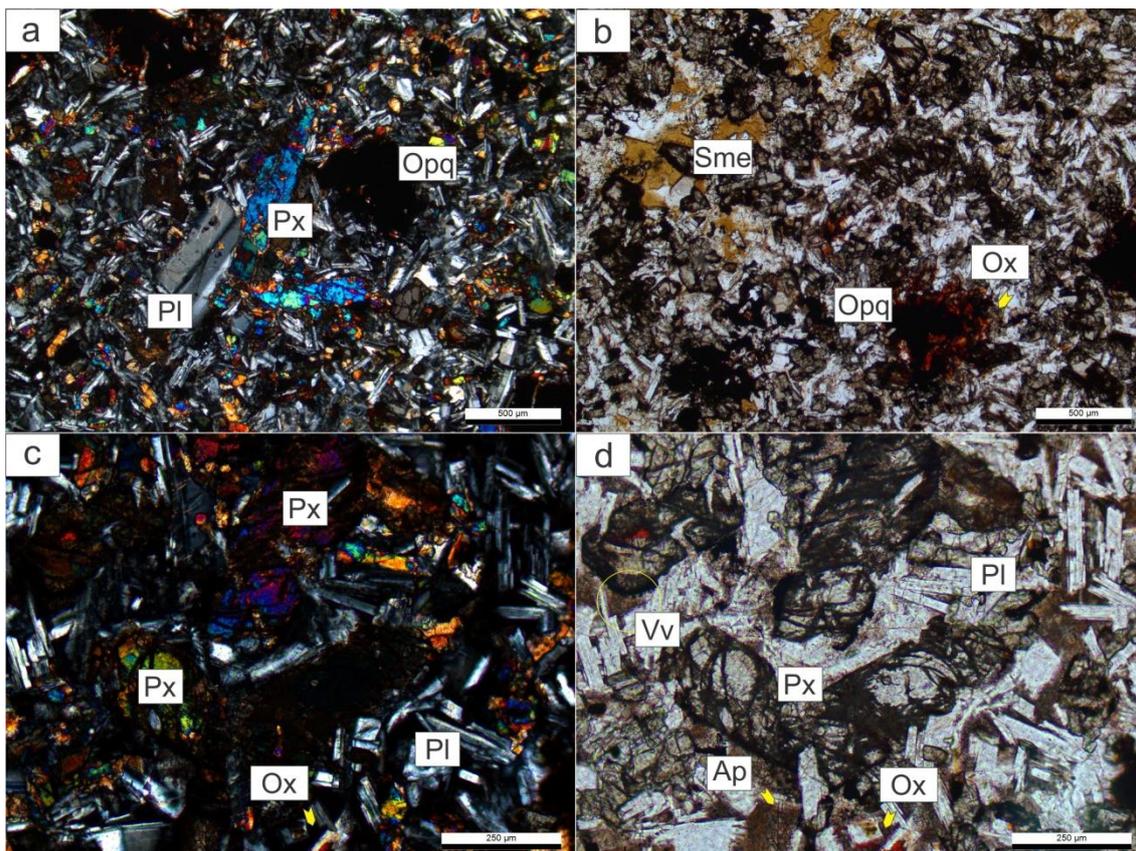


Figura 6.7. a y b. Tablillas de plagioclasas corroídas y fracturadas asociadas con augita/augita titanífera. Arcillas de tipo smectita en los interespacios cristalinos y minerales opacos. c y d. individuos de augita de mayor desarrollo, fracturados y parcialmente desferrizados. Sectores

vítreos con procesos de desvitrificación de grado muy variable. a y c: Nícoles cruzados. b y d: Luz paralela .

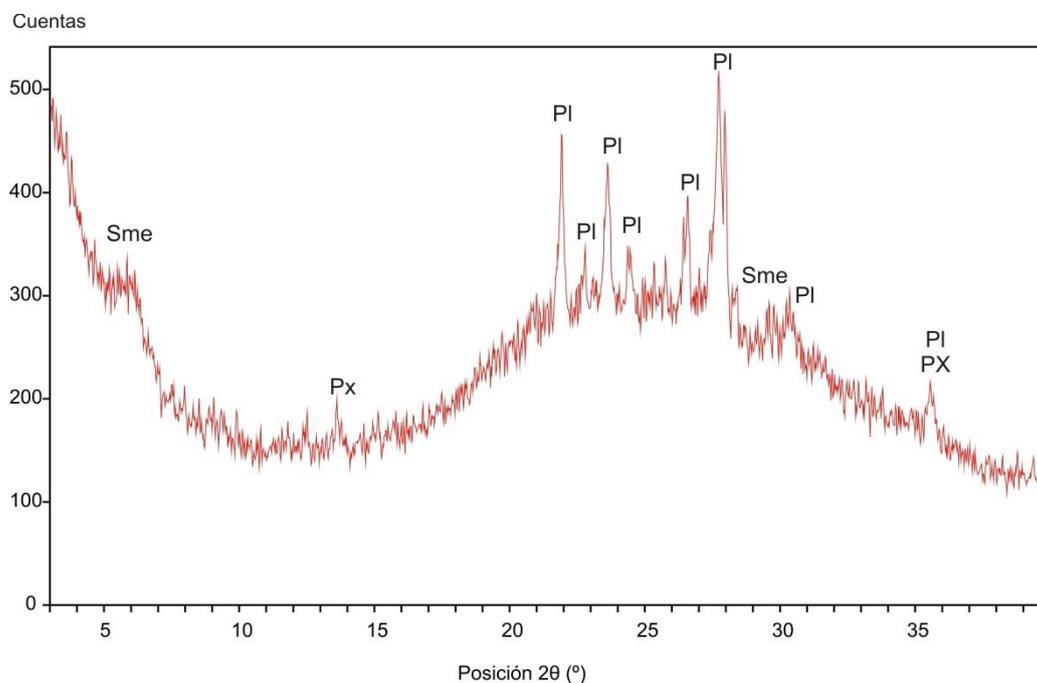


Figura 6.8. DRX del material arcilloso de la muestra "Y"

6.1.1.5 Cantera "P.Y"

La roca está constituida por fenocristales tabulares de plagioclasa (An_{34-38}), alcanzando dimensiones milimétricas (entre 0,6mm y 1,2mm). Las tablillas tienen los bordes irregulares porque en ellos se alojan principalmente augita y minerales opacos. El mafito, augita titanífera, acompaña a la granulometría con bajo grado de desferrización (Figura 6.9a y b). Se presentan zonas con alteración que se adjudican a vidrio volcánico desvitrificado, aunque se reconocen sectores aún isótropos de colores pardos considerados relictos de la palagonita original. No se observaron autolitos. La mineralogía de los interespacios dejados por las tablillas de feldespato es compleja, compuesta por minerales arcillosos (Figura 6.9c), óxidos de hierro y titanio, cloritas, apatito y en menor proporción zeolitas (Figura 6.9d). Estos minerales de alteración no pudieron ser detectados por DRX debido a la escasa proporción en que se presentan (Figura 6.10). Se reconocen zonas de desmezcla en la plagioclasa, que da lugar a la

crystalización en sectores periféricos de feldespato potásico. La textura es intersertal. La roca es un basalto toleítico.

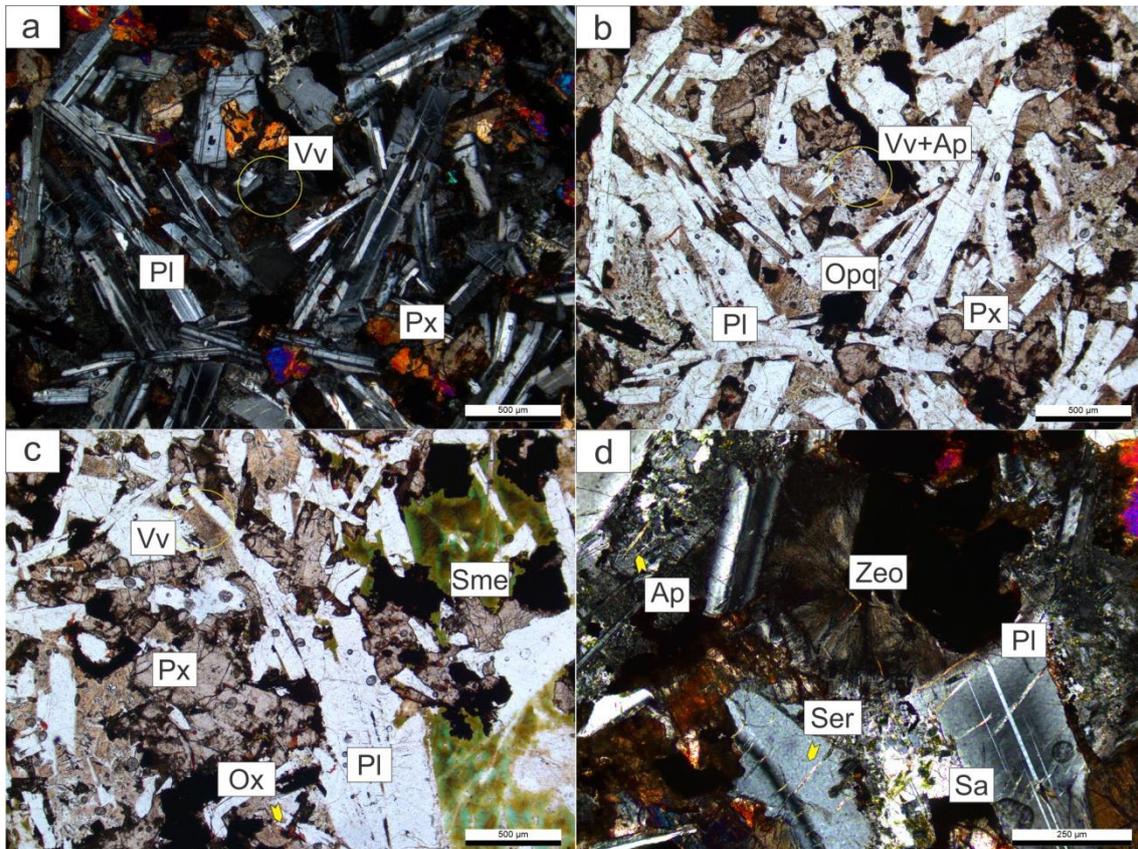


Figura 6.9. a y b. Fenocristales tabulares de plagioclasa de gran tamaño con augita, augita titanífera y minerales opacos. c. Minerales arcillosos y vidrio relíctico en los interespacios dejados por las tablillas de feldespato. d. Óxidos e hidróxidos de hierro y titanio, sericita, apatito y zeolitas. Se reconocen zonas de desmezclas.

a y d: Nícoles cruzados. b y c: Luz Paralela

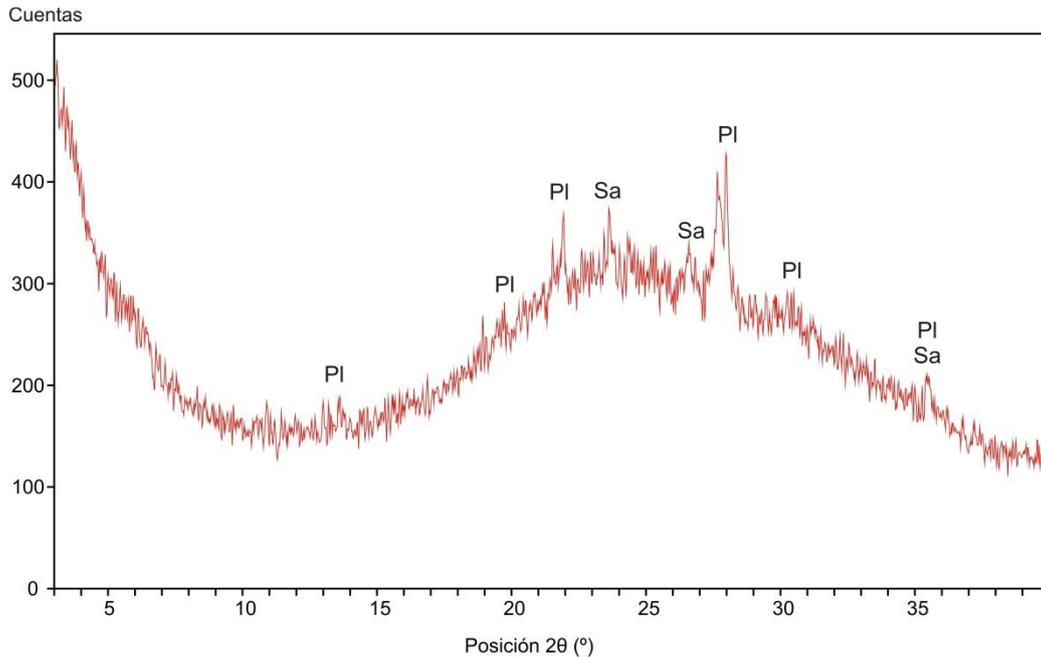


Figura 6.10. DRX del material arcilloso de la muestra "P.Y."

6.1.2 IRAM 1531 (2012)

En base a los requerimientos establecidos por la norma IRAM 1531 (2012) se calcularon los porcentajes de sustancias nocivas y de materiales potencialmente reactivos, para cada uno de los agregados estudiados. Se identificó vidrio volcánico, fresco y parcialmente alterado, como componente potencialmente reactivo, y arcillas del tipo esmectíticas, montmorillonita, como sustancia nociva. El límite establecido es de 3% y 5% respectivamente.

En la Tabla 6.1 se resumen las principales características petrográficas y mineralógicas de los agregados y los porcentajes de mesostasis, vidrio y arcillas esmectíticas calculados donde puede observarse que el contenido de vidrio volcánico en la muestra "L.A" supera el límite máximo (3%), establecido en la norma IRAM 1531, los valores determinados en la muestra "L.M" se encuentran muy cerca del límite y en las restantes ("L.D, "Y" y "P.Y" el contenido de vidrio es inferior al 3%). De estos resultados se puede concluir que, desde el punto de vista petrográfico, la única muestra que se califica como potencialmente reactiva es la correspondiente a la cantera "L.A".

Tabla 6.1. Características petrográficas y mineralógicas de los agregados.

Muestra	Roca	Minerales y abundancia relativa	Textura	% de Mesostasis	% de vidrio	% de arcilla esmectítica
L.A	Basalto toleítico	Pl>Cpx>Opq>Sme>Ap>Ox>Ser>Cal>Zeo>Si	Porfírica y pasta intersertal	≈9	≈5,3	≈2,8
L.M	Basalto toleítico	Pl>Cpx>Opq>Sme>Ap>Ox>Ser	Intersertal	≈8	≈2,5	≈2,2
L.D	Basalto andesítico	Pl>Cpx>Sa>Opq>Qz>Adl>Ox>Ser>Ap>Sme>Cal	Intergranular a Intersertal	≈3	≈0,5	<1
Y	Basalto andesítico	Pl>Cpx>Opq>Sa>Ap>Chl>Ox	Intersertal, en sectores intergranular	≈5	<1,5	≈4
P.Y	Basalto toleítico	Pl>Cpx>Opq>Sa>Qz>Ox>Sme>Ap>Chl>Zeo	Intersertal	≈8	<1	≈3

6.2 Determinación de la sílice disuelta

Siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1650 (1968) se determinó la sílice disuelta para cada uno de los agregados de las canteras estudiadas. En la Tabla 6.2 se expresan los resultados obtenidos con este método. En esta tesis se utilizó como criterio para evaluar la reactividad los resultado de experiencias previas, obtenidas por Marfil *et al.* (1995). Los autores aplicaron el método químico sobre diversos basaltos de distintos afloramientos de Argentina, comparando los resultados con la expansión medida en barras de mortero y propusieron que valores superiores a 20mg se correlacionan con rocas calificadas como potencialmente reactivas en los ensayos físicos, valores menores a los 10mg inocuas y entre 10mg y 20mg dudosas.

Tabla 6.2 Sílice disuelta determinada según el método de ensayo químico IRAM 1650 (1968).

Cantera	Sílice disuelta (mg)
L.A	56,2
L.M	35,4
L.D	7
Y	21,9
P.Y	48,5

Bajo este criterio la mayoría de las canteras superan el máximo sugerido y se calificarían como potencialmente reactivas, a excepción de la cantera “L.D” que presenta valores de sílice menores a 10mg.

6.3 Ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997)

A continuación se presenta los valores de expansión (%) vs edad (días) (Tabla 6.3 y Figura 6.11) según los valores obtenidos por la norma IRAM 1674 (1997).

Tabla 6.3. Valores de expansión según IRAM 1674.

Muestra	Expansión a la edad de (días)					
	5	8	12	16	21	28
L.A	0,065	0,258	0,404	0,472	0,516	0,538
L.M	0,047	0,146	0,227	0,269	0,297	0,327
L.D	0,020	0,095	0,136	0,207	0,283	0,329
Y	0,015	0,107	0,210	0,285	0,334	0,405
P.Y	0,185	0,328	0,442	0,503	0,591	0,615

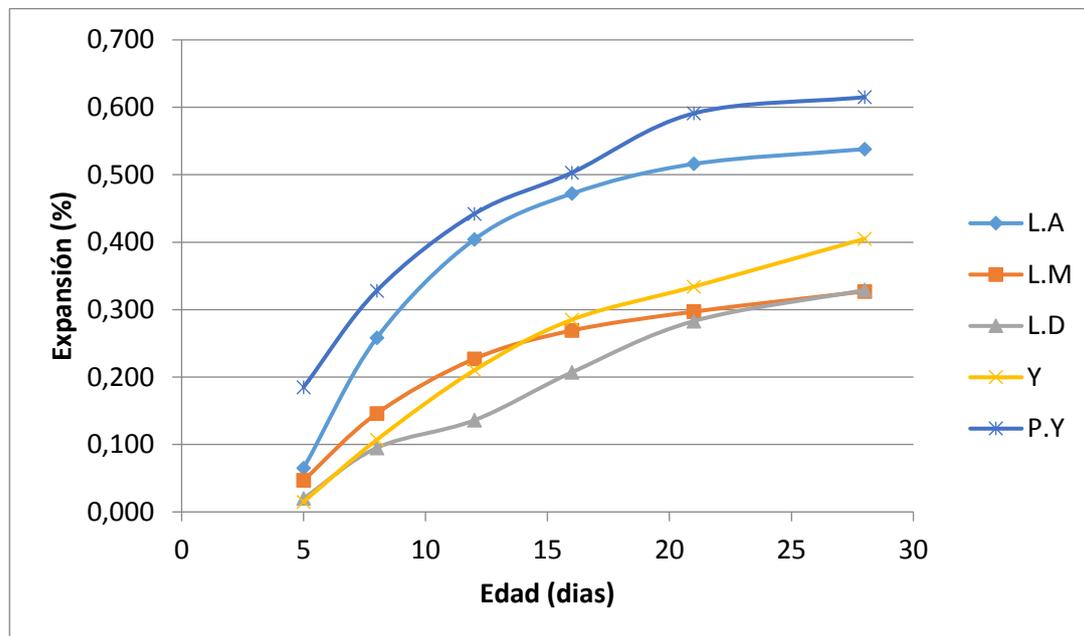


Figura 6.11. Expansión (%) vs tiempo (días) según el ensayo de barra de mortero.

La norma establece que los agregados no deben superar una expansión del 0,10% a la edad de 16 días. En base a los resultados, las rocas analizadas deben calificarse como potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice. Sin embargo cabe destacar

que las muestras “L.A” y “P.Y” duplican los valores de expansión en comparación con el resto de las muestras, y presentan una pendiente mucho más pronunciada en el gráfico de expansión vs edad, en los primeros días de ensayo. Al extender el ensayo a 28 días se observa que las curvas continúan la tendencia creciente en los valores de expansión.

6.4 Estudio petrográfico sobre barras de mortero

Una vez cumplidos los 16 días de ensayo, se estudiaron las barras bajo lupa binocular, para observar el grado de deterioro en función al desarrollo de fisuras, grado de carbonatación y determinar la presencia de productos de reacción. Todas las muestras se calificaron como potencialmente reactivas según este método, por lo que para el análisis se seleccionaron las barras confeccionadas con los agregados de las canteras “L.A” (también calificada como potencialmente reactiva en el prisma de hormigón) y “L.D” (calificada como inocua en el prisma).

Las barras confeccionadas con los agregados de la cantera “L.A” (expansión de 0,47%) registraron fuertes evidencias de daño a nivel macro y microscópico. A escala macroscópica se pudo observar la generación de fisuras, de espesor variable, con características típicas de daños atribuidos a la RAS (fisuras tipo mapa). En ocasiones están parcialmente rellenas por carbonato de calcio (Figura 6.12a y b). La superficie de la barra está fuertemente carbonatada.

En las Figuras 6.12c y d, se observa un corte transversal de la sección de la barra, donde es posible identificar fisuras y productos de reacción de tipo gel y calcita relleno de cavidades de aire accidental. La carbonatación es generalizada en toda el área de la barra (Figura 6.12d).

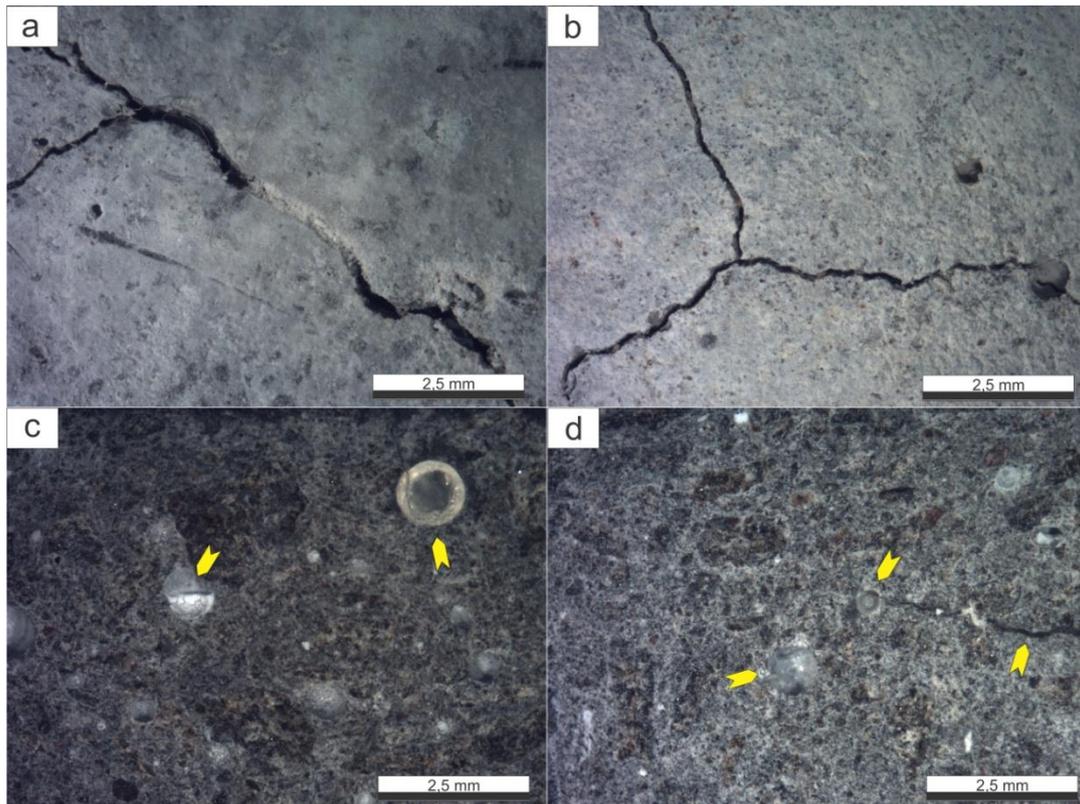


Figura 6.12. Imágenes tomadas con estereomicroscopio de barras de motero confeccionadas con los agregados de la cantera “L.A”. a y b. fisuras sobre la superficie de la barra en ocasiones rellenas con carbonato de calcio. c y d. secciones perpendiculares al largo de la barra, donde se pueden ver cavidades rellenas de productos tipo gel y calcita.

Al microscopio, sobre cortes delgados transversales a la sección de la barra, se puede apreciar que la fisuración afecta tanto al agregado basáltico como al cemento. En las Figuras 6.13a y b se observan fisuras que rodean y atraviesan al agregado. Presentan anchos variables y en ocasiones están rellenas por un material de baja birrefringencia atribuible a productos de la RAS y/o carbonato de calcio. En la Figura 6.13c se reconocen fisuras tipo mapa, desarrolladas a partir de un punto triple, característica típica de fisuración por la RAS. En la Figura 6.13d se observa una fuerte carbonatación en el mortero, y calcita relleno parcialmente tanto las fisuras como cavidades de aire accidental.

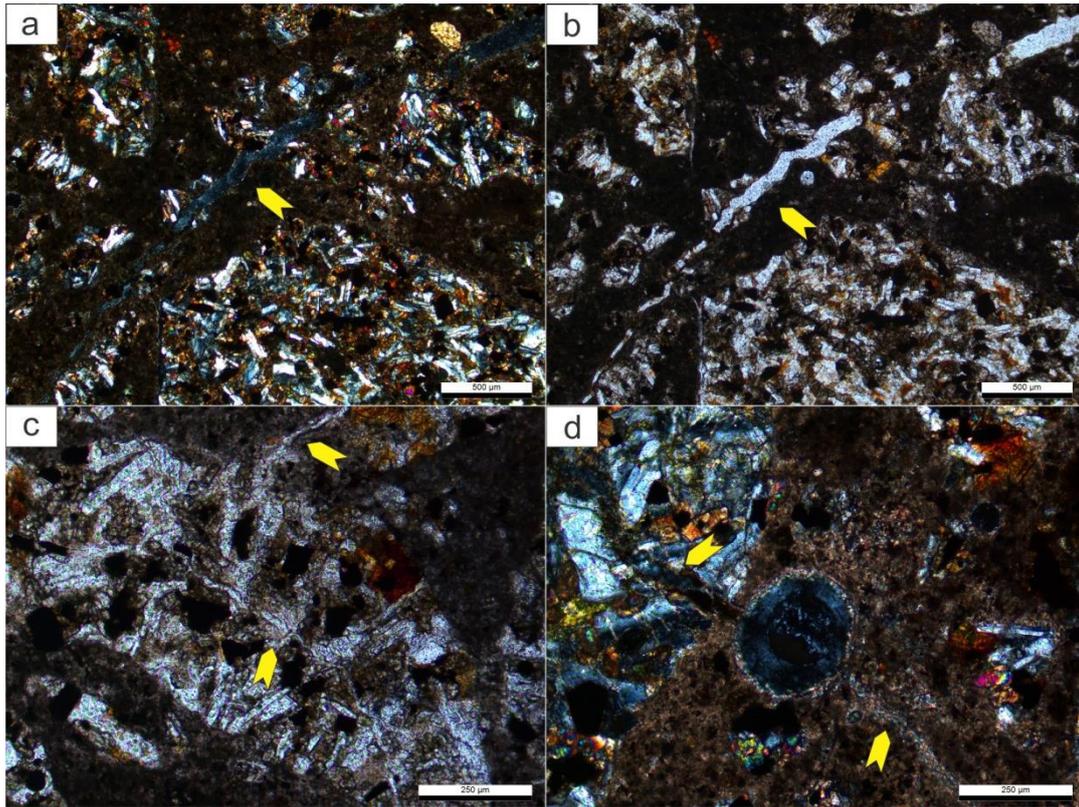


Figura 6.13. Fotomicrografías de las barras de mortero motero confeccionadas con agregados de la cantera "L.A.". a y b. Fisuras que rodean y atraviesan al agregado. Presentan anchos variables y en ocasiones están rellenas por un material de baja birrefringencia atribuible a productos de la RAS. c. fisuras tipo mapa, desarrolladas a partir de un punto triple. d. fuerte carbonatación generalizada en el mortero y calcita relleno fisuras y cavidades de aire accidental.

Las barras confeccionadas con los basaltos de la cantera "L.D", a pesar de calificar como potencialmente reactivas en el ensayo IRAM 1674 (1997), registraron la menor expansión (0,20%) en relación al resto de las canteras estudiadas. En este caso, no se reconocen fisuras a nivel macroscópico. Se puede observar una moderada carbonatación, que tapiza la superficie de la barra (Figura 6.14a y b) y rellena parcialmente cavidades de aire accidental aunque también se identifican cavidades libres de material (Figura 6.14c y d).

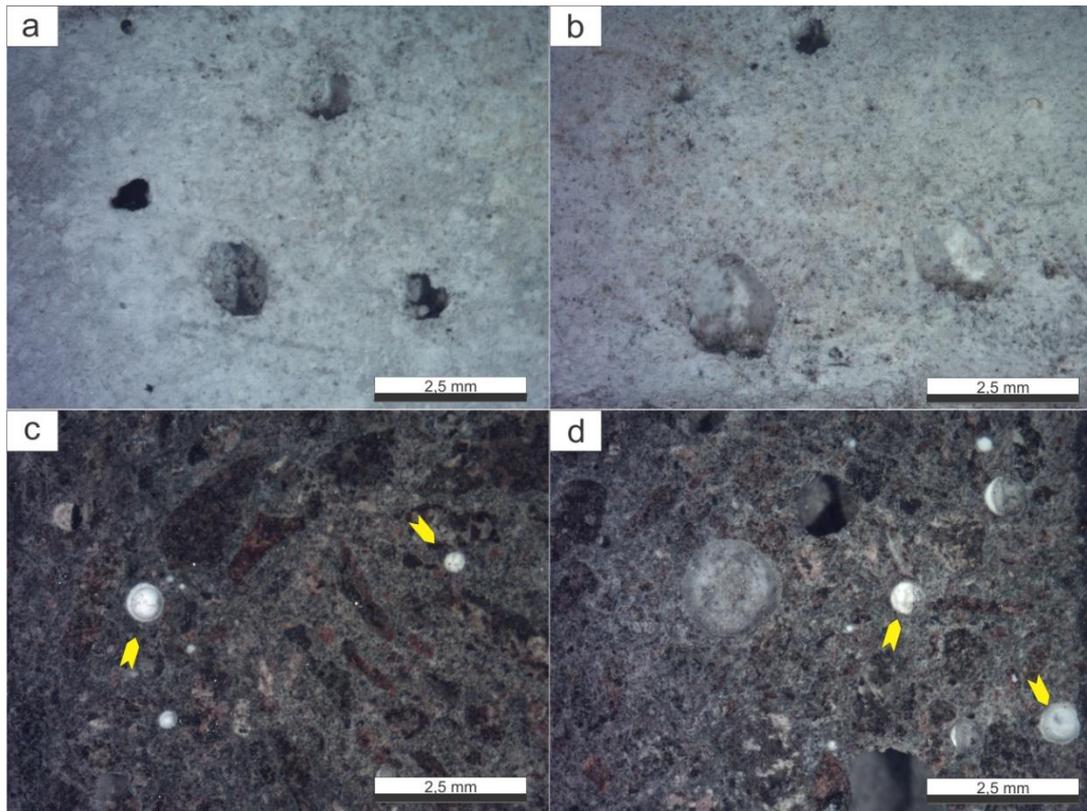


Figura 6.14. Imágenes tomadas con esteremicroscopio de barras de motero confeccionadas con los agregados de la cantera “L.D”. a y b. Superficie de la barra tapizada con carbonato de calcio. c y d. Secciones perpendiculares al largo de la barra, donde se pueden ver cavidades rellenas de calcita.

Sobre secciones delgadas se reconocieron microfisuras que atraviesan la muestra afectando tanto a la pasta como al agregado (Figuras 6.15a, b y c). La Figura 6.15d muestra la carbonatación de la pasta, localizada principalmente sobre los bordes de la barra, con escasa influencia hacia el interior.

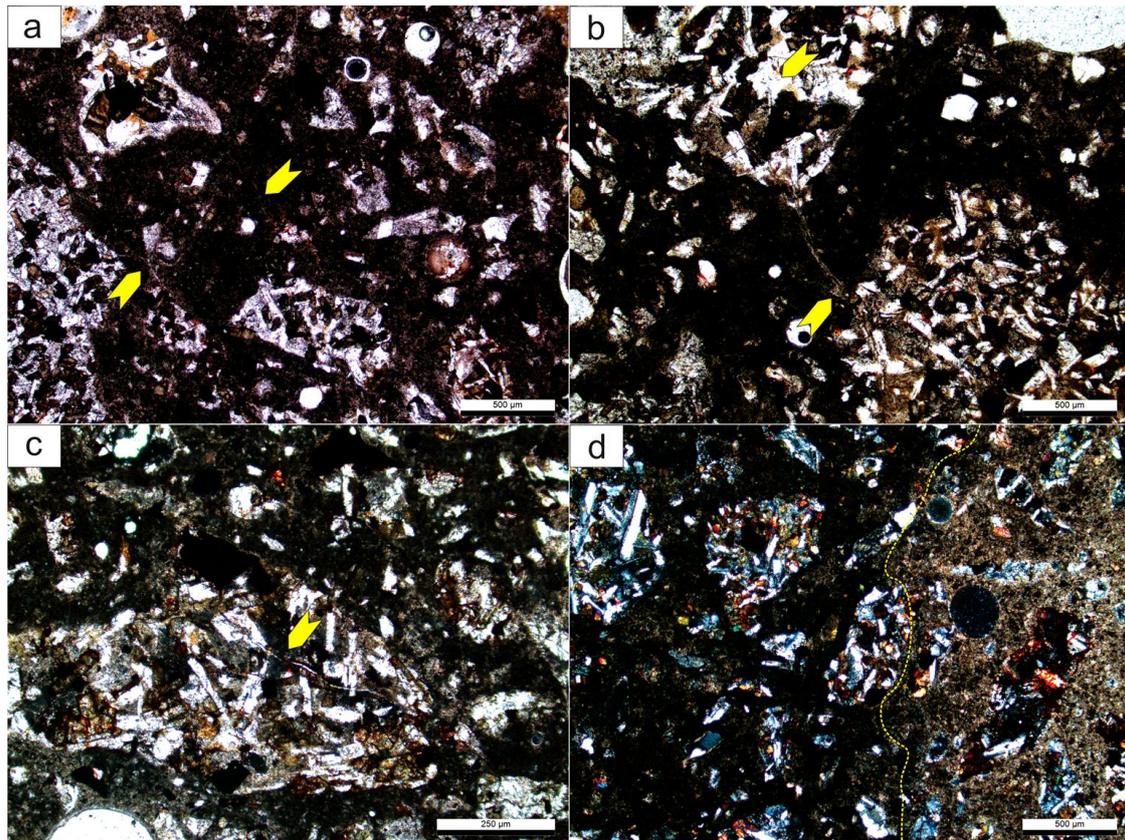


Figura 6.15. Fotomicrografías de las barras de mortero confeccionadas con agregados de la cantera “L.D”. a. Microfisuras que afectan al mortero. b y c. Microfisuras afectando al agregado basáltico. d. carbonatación del mortero sobre el borde de la barra (línea punteada).

6.5 Determinación del área fisurada con microscopía UV sobre barras de mortero a 28 días (IRAM 1674)

Luego de cumplido el tiempo de ensayo, se confeccionaron secciones delgadas de las barras de mortero, previamente impregnadas con resina fluorescente. Se realizó un barrido continuo del área ocupada por la sección delgada (25mm x 35mm) tomando un promedio de 50 imágenes por muestra. En la Tabla 6.4 se muestran los resultados obtenidos (valor promedio por imagen) del área fisurada medida sobre las barras de mortero.

Tabla 6.4. Expansión medida en el prisma de hormigón, IRAM 1674 (1997) a los 16 días y promedio de área fisurada

Muestra	Expansión medida (%) a 16 días	Área fisurada (% valor promedio)	Desvío estándar del área fisurada
"L.A"	0,472	0,33	0,14
"L.D"	0,207	0,23	0,16

El porcentaje promedio de área fisurada calculado sobre las barras de mortero muestra relación con los resultados del ensayo físico, dando mayor porcentaje para el agregado de la cantera "L.A". En la Figura 6.16a y b se muestra dos sectores de las barras correspondientes a las canteras "L.D" y "L.A" respectivamente. En la primera el mayor fisuramiento se da de manera localizada, afectando sólo la pasta. En el caso de la barra confeccionada con el agregado "L.D", las fisuras también afectan a los agregados.

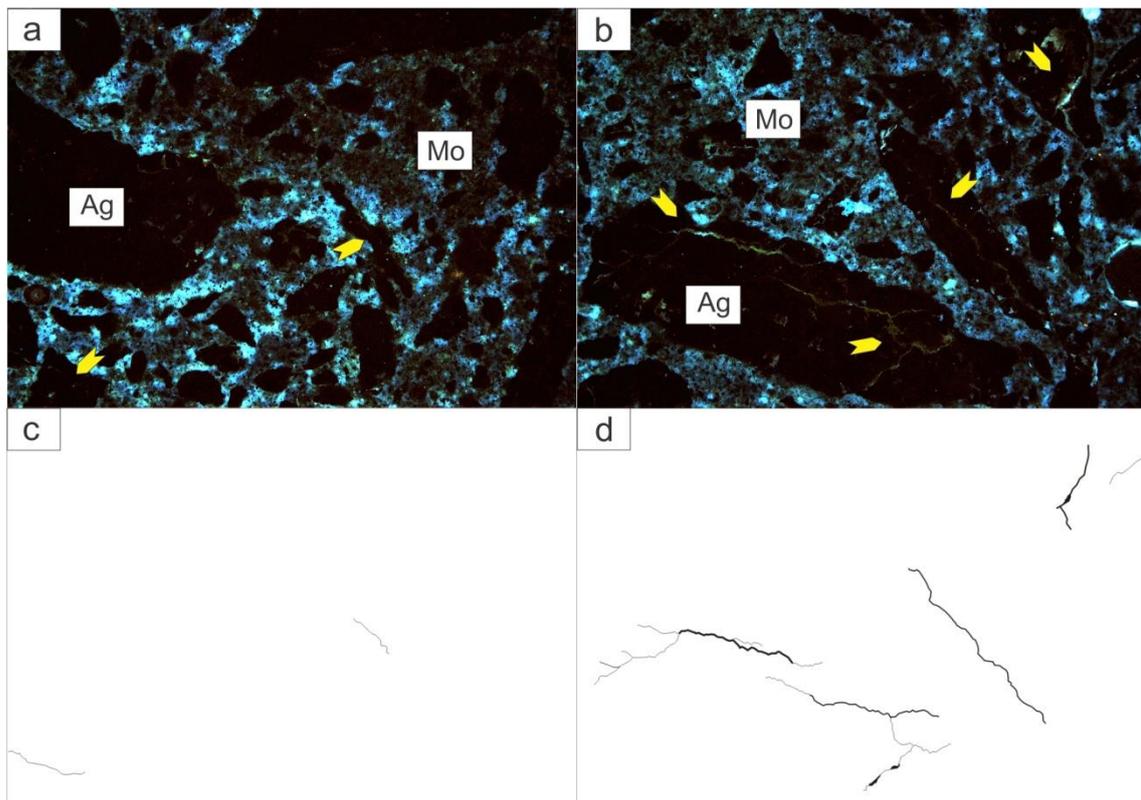


Figura 6.16. a y b. Fotomicrografías de dos sectores en las barras de mortero ensayadas según IRAM 1674 (1997), vistos con luz UV. a. Barra de mortero con la menor expansión (cantera "L.D"). b. Barra de mortero con la mayor expansión (cantera "L.A"). c y d. Mapas de fisuras de las imágenes vistas en a y b respectivamente.

6.6 Evaluación de la reactividad potencial de la arenisca de la cantera “Y”

En la cantera “Y”, se relevó un nivel de arenisca (Figura 6.17), constituida principalmente por cuarzo redondeado cementado por sílice criptocristalina que se encuentra ubicado entre la zona del destape y el nivel superior de la cantera.

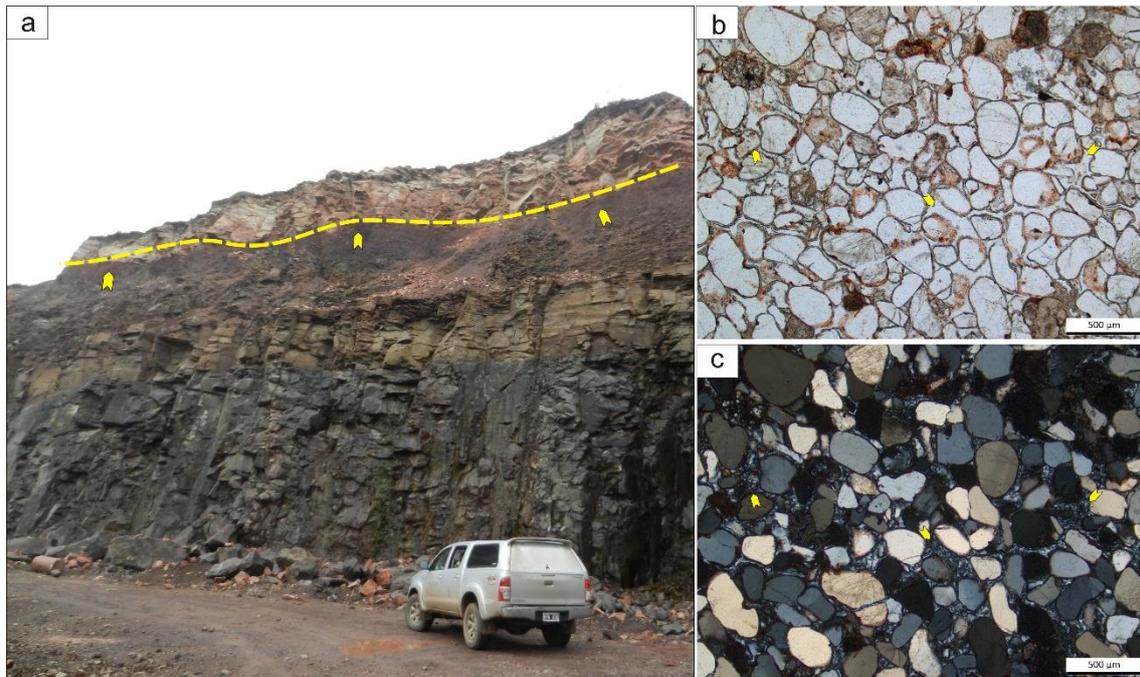


Figura 6.17. a. Fotografía del nivel superior de la cantera “Y”, donde se señala la ubicación de la arenisca. b y c. Fotomicrografía de la arenisca visto con luz paralela y nicols cruzados, respectivamente. Las flechas indican el cemento silíceo.

Si bien es un material de descarte, en los niveles subyacentes se reconocieron intercalaciones de esta arenisca con el basalto en forma de venillas o pequeños lentes pudiendo contribuir a la potencial reactividad de la roca explotada. En la Figura 6.18 se observa una muestra del nivel superior donde la arenisca se encuentra intercalada con el basalto. También se observa una venilla de calcita.

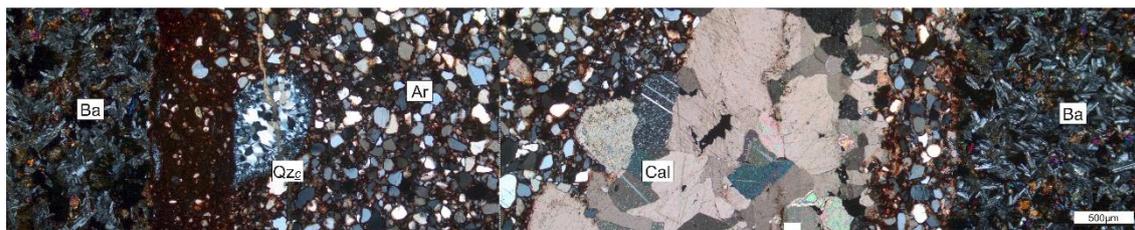


Figura 6.18. Arenisca intercalada con el basalto. Venilla de calcita, cuarzo + calcedonia. Ba: basalto, Ar: arenisca, Cal: calcita, Qzc: Calcedonia

Con el fin de evaluar la potencial reactividad de este material se realizó el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 2008) (Tabla 6.5 y Figura 6.19). La expansión superó el límite máximo establecido (0,10% a los 16 días) antes de los 8 días. Al extender el tiempo de ensayo a 28 días, la expansión sigue aumentando sin mostrar estabilización.

En este ensayo se analizó el comportamiento de la arenisca. Sin embargo debe considerarse que si este material es mezclado en proporciones variables al agregado basáltico podría desarrollar mayores expansiones debido al efecto pessimum.

Tabla 6.5. Valores de expansión según IRAM 1674 (2008).

Muestra	Expansión a la edad de (días)					
	5	8	12	16	21	28
Arenisca	0,078	0,157	0,265	0,357	0,473	0,536

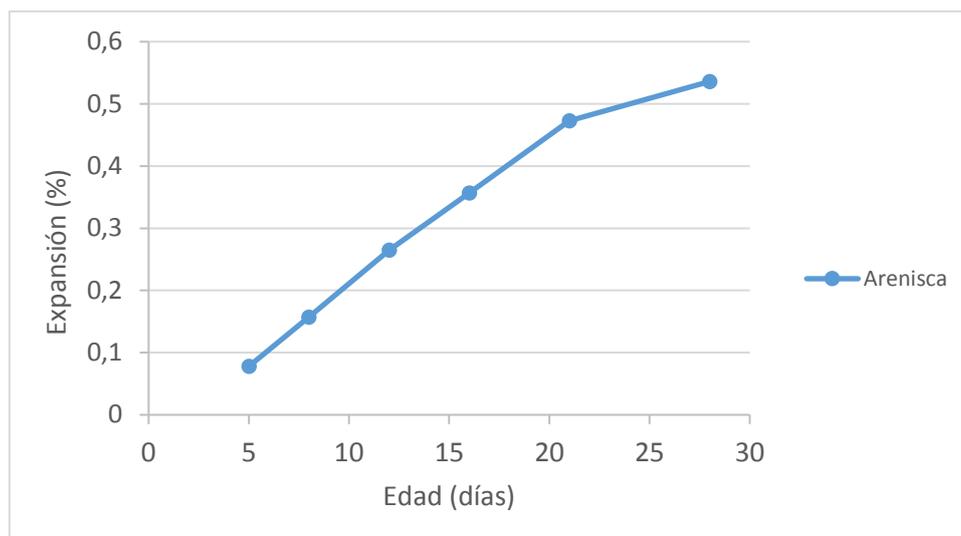


Figura 6.19. Expansión (%) vs tiempo (días) según el ensayo de barra de mortero.

6.7 Ensayos de expansión sobre prismas de hormigón IRAM 1700 (2012)

6.7.1 Método convencional del prisma de hormigón

Considerando que este método es uno de los más confiables para determinar la reactividad alcalina potencial de los agregados, se ensayaron las muestras a 38°C durante 52 semanas, tal como especifica la norma. Los resultados de expansión se pueden observar en la Tabla 6.6 y Figura 6.20.

Tabla 6.6. Valores de expansión según IRAM 1700 a 38°C hasta las 52 semanas.

Muestra	Variación de longitud (% de expansión) a la edad de (semanas)									
	1	2	4	8	13	18	26	39	45	52
L.A	0,001	0,001	0,004	0,004	0,009	0,006	0,015	0,024	0,042	0,068
L.M	0,005	0,005	0,007	0,007	0,008	0,007	0,010	0,010	0,009	0,012
L.D	0,005	0,003	0,003	0,005	0,005	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003
Y	0,000	0,000	0,002	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,004	0,005
P.Y	0,000	0,003	0,004	0,005	0,013	0,010	0,054	0,161	0,206	0,221

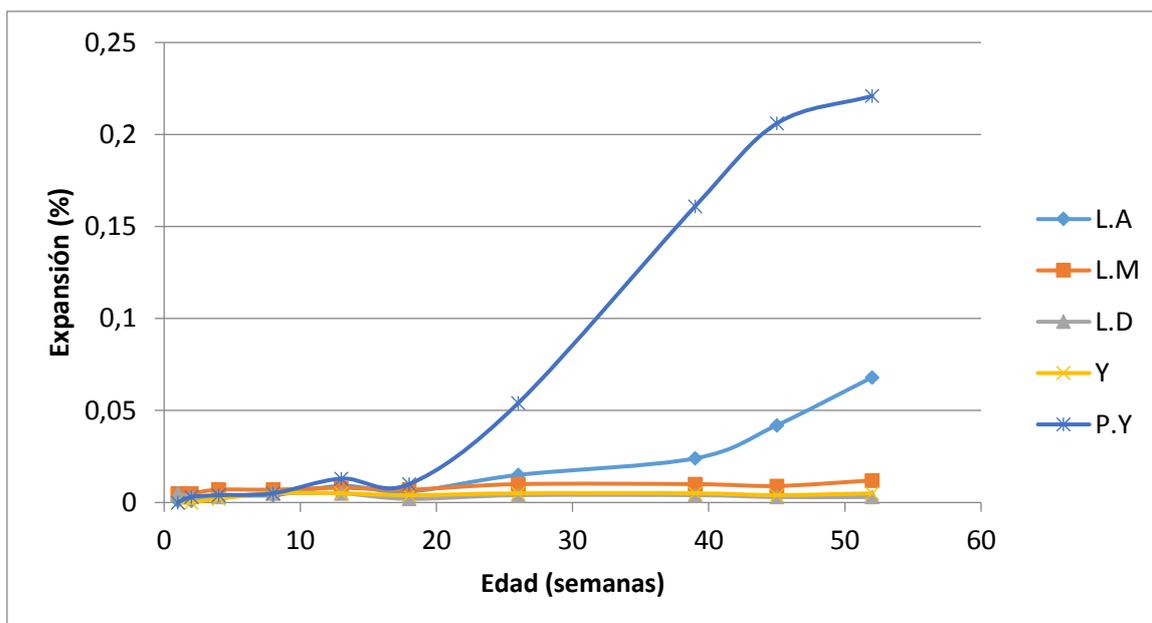


Figura 6.20. Expansión (%) vs tiempo (semanas) según el ensayo convencional del prisma de hormigón (IRAM 1700).

Al cabo de 52 semanas las muestras “P.Y” y “L.A” superan el límite máximo de 0,04% de expansión estipulado por la norma para considerarlas como potencialmente reactivas. Sin embargo la curva de la muestra “P.Y” a partir de la 20 semanas presenta una pendiente más pronunciada, superando el límite máximo en la semana 26, en comparación a la muestra “L.A” que alcanza el límite a la edad de 42 semanas. La curva “P.Y” parece estabilizarse al final del ensayo, mientras que “L.A” continúa con su tendencia creciente, indicando en el primer caso que aún continúa expandiendo en el tiempo mientras que en la segunda ha finalizado el proceso expansivo. El resto de los agregados (“L.M”, “L.D” y “Y”) se califican como inocuos evidenciando un comportamiento estable a lo largo del periodo de ensayo.

6.7.2 Método acelerado del prisma de hormigón

En la Tabla 6.7 y Figura 6.21 se pueden observar los valores de expansión medidos sobre prismas de hormigón ensayados a 60°C con lecturas periódicas hasta alcanzar las 20 semanas. La norma establece que si los valores son mayores a 0,04% a las 13 semanas el agregado debe considerarse potencialmente reactivo.

Tabla 6.7. Valores de expansión según IRAM 1700 a 60°C.

Muestra	Expansión a la edad de (semanas)					
	5	8	10	13	15	20
L.A	0,019	0,038	0,045	0,053	0,055	0,058
L.M	0,020	0,031	0,035	0,039	0,042	0,040
L.D	0,003	0,008	0,009	0,010	0,012	0,010
Y	0,005	0,010	0,009	0,010	0,011	0,011
P.Y	0,025	0,051	0,068	0,080	0,083	0,087

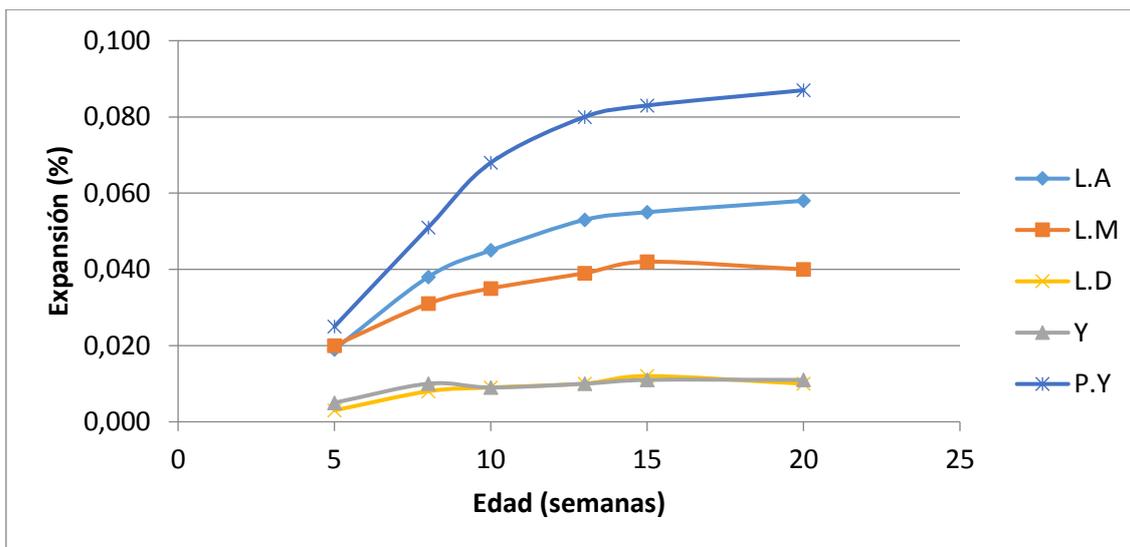


Figura 6.21. Expansión (%) vs tiempo (semanas) según el ensayo acelerado del prisma de hormigón.

De los resultados obtenidos y en coincidencia con el método convencional se puede observar que los agregados de las canteras "P.Y" y "L.A" superan el límite máximo establecido a la semana 10. En ambas muestras se observa un comportamiento similar alcanzando un periodo de estabilización a partir de la semana 15. El agregado "L.M" presenta un valor muy cercano al límite, con una expansión de 0,039. Al extender el ensayo a las 20 semanas, la muestra sigue expandiendo hasta superar el límite establecido, por lo cual debería ser considerado como potencialmente reactivo frente a la RAS. Al final del ensayo la curva muestra una leve contracción. Las muestras "L.D" y "Y" tienen un comportamiento estable durante las 25 semanas, presentando expansiones por debajo del 0,04% establecido como límite para considerarlas como potencialmente reactivas.

6.8 Estudios sobre prismas de hormigón a 5 años de ensayo (IRAM 1700)

Con el propósito de evaluar la evolución de la expansión en el tiempo, se tomaron dos de las muestras analizadas y una calificada como potencialmente reactiva ("L.A") y otra que no mostró expansión al cabo del año ("Y") y se continuaron las mediciones hasta los 5 años. Los resultados se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Valores de expansión según IRAM 1700.

Muestra	Expansión a la edad de (años)				
	1	2	3	4	5
"L.A"	0,070	0,092	0,095	0,093	0,091
"Y"	0,010	0,008	0,010	0,009	0,007

En la Figura 6.22 se puede observar que la expansión siguió aumentando hasta los tres años y luego se estabiliza, incluso en el último periodo de ensayo en ambas muestras se observa una leve contracción.

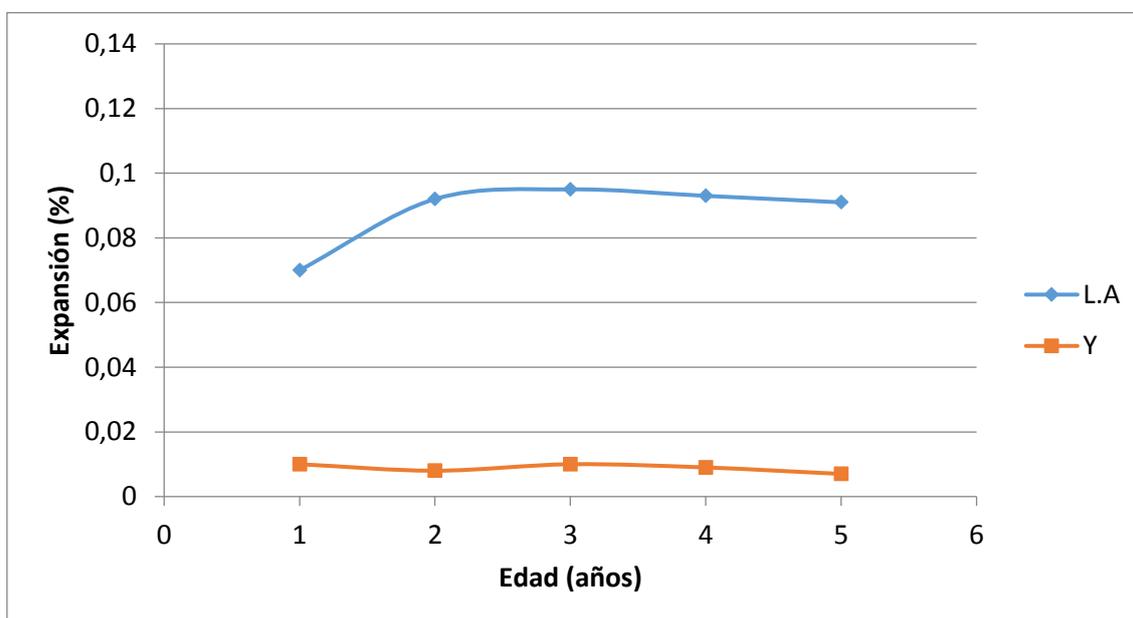


Figura 6.22. Expansión (%) vs tiempo (años) según el ensayo de prisma de hormigón.

Finalizado el tiempo de ensayo se efectuaron estudios de detalle, tanto macro como microscópicos sobre los prismas de hormigón, con la finalidad de conocer el grado de deterioro, desarrollo de fisuras, y determinar la presencia y localización de productos de neoformación.

A nivel macroscópico los prismas no presentan, en su superficie, evidencias de fisuramiento. Debido a la escasa cantidad de material de neoformación, no fue posible la identificación de las especies presentes. Al microscopio se pudo observar variación entre las muestras, coincidente con el grado de expansión medido en el ensayo normalizado. La Figura 6.23a y b, corresponde a los prismas elaborados con el agregado de la cantera "L.A", el cual es calificado como potencialmente reactivo frente a la RAS. Las fisuras generadas, afectan tanto a la pasta como al agregado grueso. El ancho de las mismas es variable y en ocasiones están parcialmente rellenas de carbonato de calcio. La carbonatación en la pasta es heterogénea, siendo más marcada en los bordes del prisma o en zonas fisuradas. No se reconocieron minerales de neoformación en las fisuras ni en las cavidades de aire accidental.

El agregado de la cantera "Y", calificado como inocuo según la norma IRAM 1700 (expansión al año 0,010%) presenta, a nivel macroscópico, baja carbonatación del mortero (Figura 6.23c) y se reconocen pequeñas fisuras que afectan solo a la pasta (Figura 6.23d). Las cavidades de aire accidental se encuentran vacías.

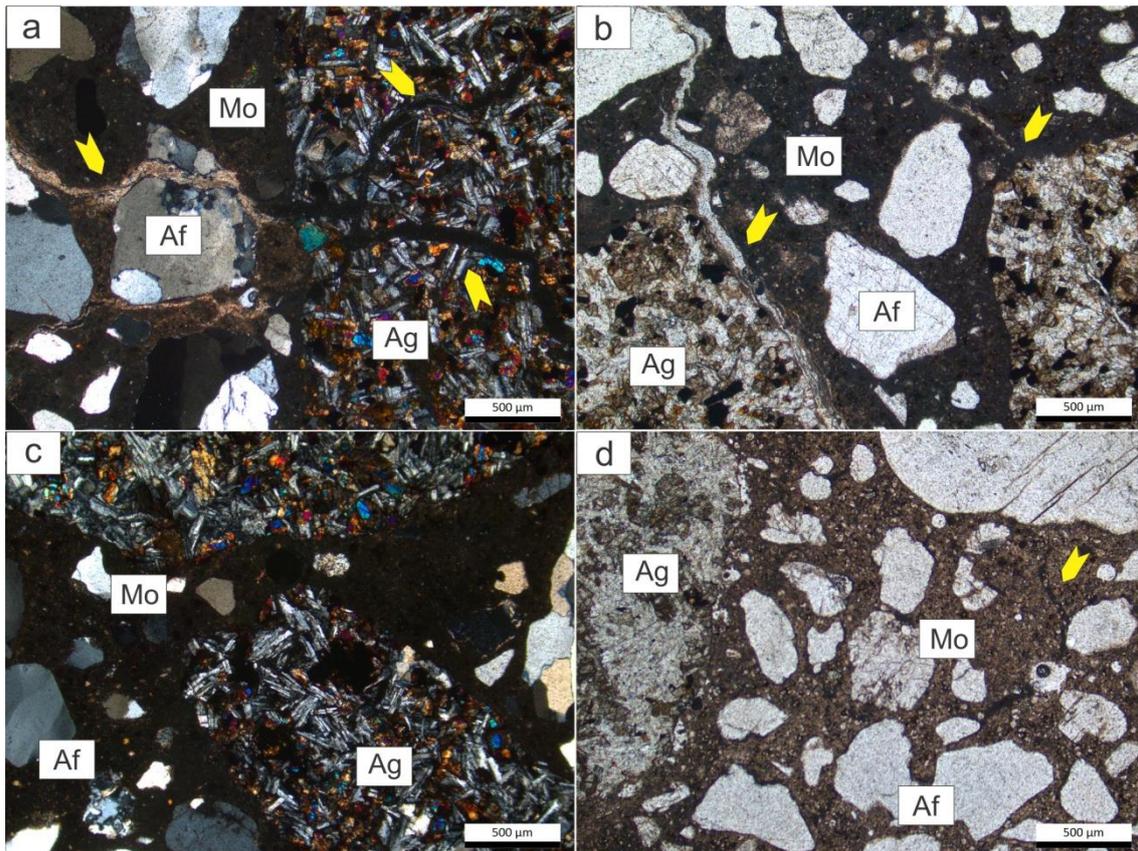


Figura 6.23. Fotomicrografías de los prismas de hormigón ensayados hasta 5 años de edad. a y b. Prisma elaborado con los agregados de la cantera “L.A”. Se observan microfisuras afectando tanto a la pasta como al agregado grueso. La carbonatación en la pasta es heterogénea. c y d .

Prisma elaborado con los agregados de la cantera “Y”. Se reconocen pequeñas fisuras que afectan solo al mortero. Ag: agregado grueso, Af: agregado fino, Mo: mortero.

6.9 Determinación del área fisurada con microscopía UV sobre prismas de hormigón a 5 años de ensayo (IRAM 1700)

En los prismas, sobre las secciones delgadas impregnadas con resina fluorescente, se realizó un barrido continuo del área ocupada (25mm x 35mm) tomando un total de 35 imágenes por muestra. En general se observa que el fisuramiento afecta principalmente al mortero, por lo que los valores de área fisurada varían en función del porcentaje de agregado grueso en cada campo del microscopio.

En la Tabla 6.9 se muestra los resultados obtenidos (valor promedio de 35 mediciones por imagen) del área fisurada y se comparan con la expansión en el prisma de

hormigón, a la edad de cinco años. Se puede observar a mayor expansión en el ensayo del prisma de hormigón mayor es el área fisurada promedio.

Tabla 6.9. Expansión medida en el prisma de hormigón, IRAM 1700 (2012) a los 5 años y promedio del área fisurada.

Muestra	Expansión a 5 años (%)	Área fisurada (% valor promedio)	Desvío estándar del área fisurada
"L.A"	0,162	0,95	1,74
"Y"	0,007	0,74	0,49

La mayoría de las fisuras en los prismas que no mostraron expansión deletérea (Muestra "Y") tienen un ancho promedio que no supera 0,01mm mientras que las relacionadas a la muestra que resultó potencialmente reactiva ("L.A") tienen un ancho que varía entre 0,07mm y 0,2mm. Las primeras estarían vinculadas con fenómenos de retracción y no tendrían relación con la RAS.

En la Figura 6.24a y b se muestra dos imágenes de los prismas que evidenciaron mayor y menor expansión, correspondientes a las canteras "L.A" y "Y" respectivamente. En la primera el mayor fisuramiento afecta al agregado grueso mientras que en la Figura 6.24b, el escaso microfisuramiento se desarrolla en el mortero. Se considera que el desvío estándar es alto porque el área del campo del microscopio es pequeña en relación al tamaño de partícula del agregado grueso, y el microfisuramiento no es igual en el mortero que en el agregado, por lo que los valores dependen también del porcentaje que representa el área que ocupa el agregado basáltico en la imagen. Los mapas de fisuras, se exportaron y transformaron a imágenes binarias (blanco y negro) (Figura 6.24c y d) para el cálculo del área fisurada de cada uno.

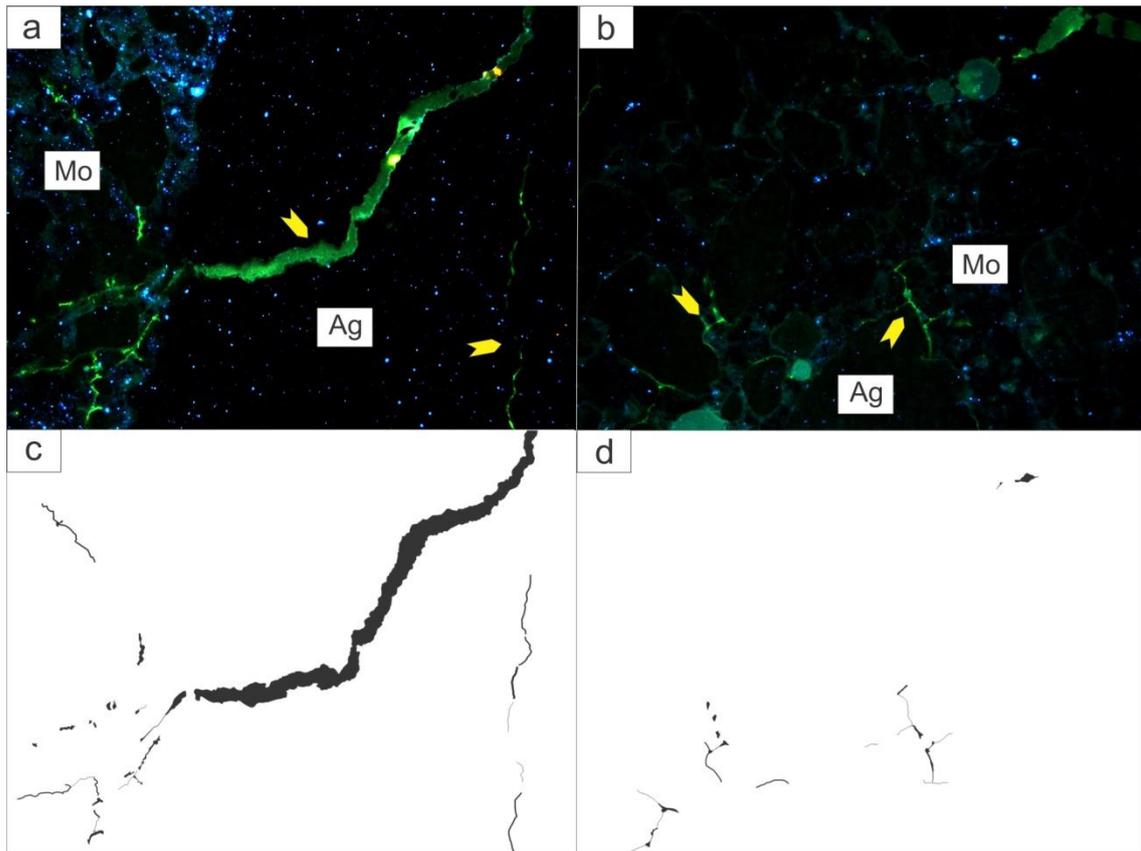


Figura 6.24. a y b. Fotomicrografías. Fisuras en los prismas de hormigón ensayados según IRAM 1700, vistos con luz UV. a. Prisma con la máxima expansión (cantera “L.A”). b. Prisma con la menor expansión (cantera “Y”). c y d. Mapas de fisuras, de las imágenes vistas en a y b respectivamente. Ag: agregado grueso, Mo: mortero.

6.10 Consideraciones finales

En la Tabla 6.10 se resume los resultados obtenidos en los ensayos normalizados y los límites establecidos para cada uno de ellos. En rojo se indican los que superaron el valor máximo establecido y califican a la muestra como potencialmente reactiva frente a la RAS. En verde se presentan los valores que califican al agregado como inocuo.

Tabla 6.10. Resumen de los valores obtenidos

Muestra	Sílice disuelta (mg) IRAM 1650	Expansión (%) Según IRAM 1674	Expansión (%) según IRAM 1700 a 60°C	Expansión (%) según IRAM 1700 a 38%	Vidrio (%) IRAM 1531
<i>Límite</i>	20	0,010	0,040	0,040	3
L.A	56,2	0,472	0,053	0,068	5,3
L.M	35,4	0,269	0,039	0,012	2,5
L.D	7,0	0,207	0,010	0,003	0,5
Y	21,9	0,285	0,010	0,005	1,5
P.Y	48,5	0,503	0,080	0,221	<1

En la Figura 6.25 se correlaciona la sílice disuelta (mg) determinada según la norma IRAM 1650, en función a los valores de expansión obtenidos de los ensayos del prisma de hormigón convencional, prisma de hormigón acelerado y barras de mortero. En el gráfico se observa que si bien existe correlación entre los ensayos, la mejor tendencia se ajusta a la relación entre los valores de sílice disuelta y expansión en las barras de mortero ($R^2 = 0,81$) dado que en ambos casos casi todas las muestras (a excepción de "L.D", en la sílice disuelta) superaron los límites normativos y califican como potencialmente reactivas. Las correlaciones con los resultados de expansión en el prisma de hormigón si bien arrojaron valores más bajos ($R^2 = 0,74$ y $0,65$ para el ensayo acelerado y convencional respectivamente) se puede observar que las muestras que dieron mayor expansión son las que liberaron en general más sílice en el ensayo químico, con excepción de la muestra "L.D." con valores muy bajos (7 mg de sílice) para expansiones similares que "Y" que dio valores de sílice de 21,9 mg.

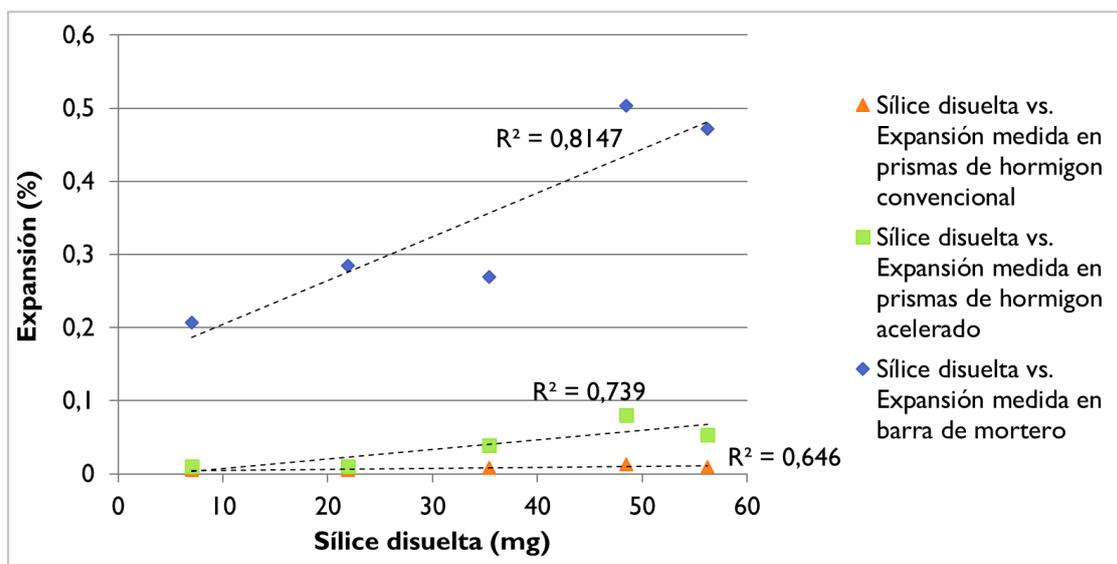


Figura 6.25. Sílice disuelta (mg) (IRAM 1650) vs. expansión (%) en prismas de hormigón convencional y acelerado (IRAM 1700 a 38°C y 60°C respectivamente) y barras de mortero (IRAM 1674).

En la Figura 6.26 se relacionan los porcentajes de vidrio en función a la expansión medida en todos los ensayos. Se puede observar que no existe correlación entre ninguna de las variables respecto a su contenido.

Esto puede deberse a que en el examen petrográfico se cuantificó el contenido de “Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas” tal lo establece la norma IRAM 1531 (2012). En las rocas estudiadas el vidrio está en parte fresco, alterado a arcillas esmecticas y/o parcialmente desvitrificado. Este último tipo no está incluido en la cuantificación de la arcilla ni del vidrio. Sin embargo este material es susceptible a reaccionar con los álcalis pudiendo contribuir al desarrollo de la RAS.

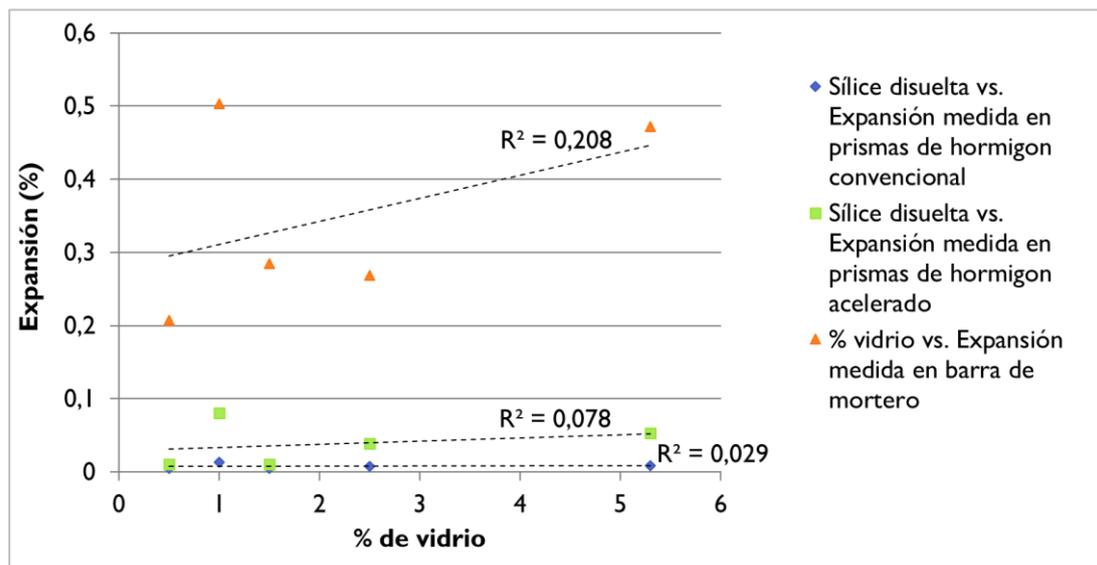


Figura 6.26. Porcentaje de vidrio (IRAM 1531) vs. valores de expansión (%) en el prisma de hormigón convencional y acelerado (IRAM 1700 a 38°C y 60°C respectivamente y barras de mortero (IRAM 1674).

Cabe destacar que a pesar de que las líneas de tendencias, no presentan un buen ajuste, los mayores valores de expansión en las barras de mortero, prisma acelerado y contenido de sílice disuelta, se dan en el caso de las canteras “L.A” y P.Y”, las cuales son las únicas que califican en los tres ensayos como potencialmente reactivas.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS. Casos de Estudio

En este capítulo se analizan dos obras de hormigón, de la provincia de Corrientes, realizadas con agregados basálticos de la región mesopotámica estudiados en esta tesis. Se trata de pavimentos con evidencias de deterioro, posiblemente vinculado a la RAS. Se llevó a cabo un relevamiento visual y se extrajeron testigos de hormigón. Sobre estos últimos se realizaron ensayos físicos, estudios petrográficos y determinaciones mediante SEM-EDS para identificar productos de reacción.

7.1. Pavimento de hormigón urbano

Se estudió un tramo del pavimento con deterioro, de la calle Rafael Perazzo entre Irastorza y Caá Guazú, de la ciudad de Curuzú Cuatiá. Las losas fueron construidas en el año 1997, en la Figura 7.1 se muestra la localización del tramo relevado.



Figura 7.1. Ubicación de las losas de pavimento de la calle Rafael Perazzo.

7.1.1 Características de la obra e inspección visual

El pavimento presenta un ancho total de 7,40 metros, con una junta longitudinal en el centro de la calzada y juntas de contracción cada 5,0 metros, conformando de esta manera losas rectangulares de 3,70 x 5,00 metros. En correspondencia con las veredas el pavimento presenta un cordón de hormigón integrado a la losa cuyo espesor oscila entre 13,5 y 20,5cm con un valor promedio de 15,8 cm. En la Tabla 7.1 se presentan los resultados obtenidos de la inspección visual.

Tabla 7.1. Inspección visual del pavimento de hormigón (CuruzúCuatiá).

Grado de fisuramiento: L= leve; M= moderado; S= severo.

Estructura	Presencia de fisuras y grado de deterioro			Observaciones
	tipo mapa asignable a contracción del mortero de superficie	contracción plástica o autógena	tipo mapa asignable a fenómenos deletéreos tipo RAS	
Pavimento de hormigón urbano (Curuzú Cuatiá, Corrientes)	SI-M	NO	SI-S	Fisuras superficiales “tipo mapa” a nivel del mortero de terminación en grado moderado y con extensión longitudinal asignables a fenómenos deletéreos del tipo RAS en grado severo con afectación estructural del pavimento

El estado de fisuración en la mayoría de las losas resulta moderado a severo. Las fisuras asignadas a fenómenos de RAS poseen distribución errática tipo mapa aunque en algunos sectores se orientan preferentemente en dirección longitudinal (Figura 7.2.a). En varias de ellas se observó exudación de material de color blanquecino. Se reconoció la presencia sistemática de fisuras, atribuibles a fenómenos de contracción a nivel del mortero de terminación en la superficie del pavimento. No se observaron fisuras por contracción plástica.

Se extrajeron 5 testigos de 15cm de diámetro conforme a las recomendaciones establecidas en la norma IRAM 1551 (2000). En el análisis visual, se identificaron oquedades en general de grado leve, reflejando condiciones de compactación aceptables para el tipo de estructura. No se apreciaron signos de segregación del agregado grueso y de la fase mortero. La masa del hormigón presenta características homogéneas desde el punto de vista de la distribución de sus componentes (agregado grueso y mortero) y contiene un agregado grueso de 19mm de tamaño máximo. Los testigos presentan en general fisuras tanto superficiales, como en la masa, atribuibles a fenómenos deletéreos del tipo de la reacción álcali – sílice (Figura 7.2.b). Las fisuras en la masa se desarrollan preferentemente según planos horizontales interceptados por fisuras verticales que presentan ramificaciones, algunas atraviesan el agregado. Se observaron coronas de reacción en torno a las partículas de agregado grueso con exudación de productos blancos que colmatan poros y fisuras (Figura 7.2.c). En la Tabla 7.2 se resumen los resultados de la observación visual de los testigos.

Tabla 7.2. Resultados de la observación visual en testigos. D: Fisuras por fenómenos deletéreos o problemas de durabilidad. FV-P: fisura vertical pasante; FH: fisura horizontal; FV-NP: fisura vertical no pasante; FH: fisura horizontal. Grado: L= leve; M= moderado; S= severo.

	Tipo/Nº de testigos	Grado/Nº de testigos
Fisuras superficiales	D/5	S/2, M/1, L/2
Fisuras masa	D/4. 3 FV-P; 1FV-NP; 3 FH	S/3, 1/1
Oquedades	Sí en todos los testigos	L5
Segregación	No se observó	

Sobre submuestras de los testigos extraídos se realizaron ensayos físicos. Los resultados se resumen en la Tabla 7.3.

7.1.2 Características petrográficas y SEM-EDS

Del análisis petrográfico realizado en los capítulos anteriores se pudo establecer que el agregado grueso está constituido por la piedra partida basáltica de la cantera “L.M”, caracterizado por un contenido de vidrio ~2,5% y aproximadamente un 2% de arcillas de tipo smectítica. Además se observa aproximadamente 5% de areniscas silíceas

compuestas por cuarzo microcristalino y calcedonia. El agregado fino es una arena natural constituida por cuarzo, areniscas ferruginosas y calcedonia. A nivel petrográfico los halos de reacción en los agregados basálticos no son muy evidentes (Figura 7.2.d) aunque se observan halos bien desarrollados en la periferia de las areniscas ricas en calcedonia (Figura 7.2.e y 7.2.f) y en cavidades de aire accidental.

Por SEM-EDS se reconoce en la interface pasta-agregado grueso y en cavidades de aire accidental, productos masivos y agrietados tipo gel (Figura 7.3.a), que corresponden a silicatos de calcio (probablemente hidratados) con cantidades menores de sodio y potasio (Figura 7.3.c). También se reconocen productos cristalinos laminares a fibrosos dispuestos en forma radial (Figura 7.3.b), que corresponden a silicatos de calcio, sodio y potasio, con cantidades menores de aluminio (Figura 7.3.d). En la interfase pasta-agregado fino también se reconoce una delgada capa de material de neoformación (Figura 7.3.e) que corresponde a un silicato de calcio (Figura 7.3.f). El mortero tiene microfisuramiento moderado especialmente en los sectores donde se concentran los minerales de neoformación. Algunas microfisuras están rellenas de ettringita (Figura 7.3.e y 7.3.g). Los poros de aire accidental están parcial o totalmente rellenos por ettringita (Figura 7.3.h) y la pasta de cemento se encuentra poco carbonatada.

Tabla 7.3. Propiedades físicas

Testigo/ muestra	Densidad seca	Densidad saturada superficie seca	Absorción	Porosidad	Pérdida por calcinación	Contenido unitario de agregado fino seco	Contenido unitario de agregado grueso seco
	Ds	Dsss	A	P	PxC	CUAF	CUAG
	[Kg/m ³]	[Kg/m ³]	[%]	[%]	[%]	[Kg/m ³]	[Kg/m ³]
1	2427	253,1	4,3	10,4	4,4	758	1209
2	2451	2535	3,4	8,4	4,2	816	1232
3/a	2382	2501	5,0	11,9	4,3	848	1111
3/b	2348	2472	5,3	12,4	4,7	958	890
4/a	2445	2546	4,1	10,1	4,0	788	1199
4/b	2446	2548	4,2	10,2	3,8	750	1290
5/a	2460	2550	3,7	9,1	4,1	770	1273
5/b	2459	2553	3,8	9,5	4,1	774	1269

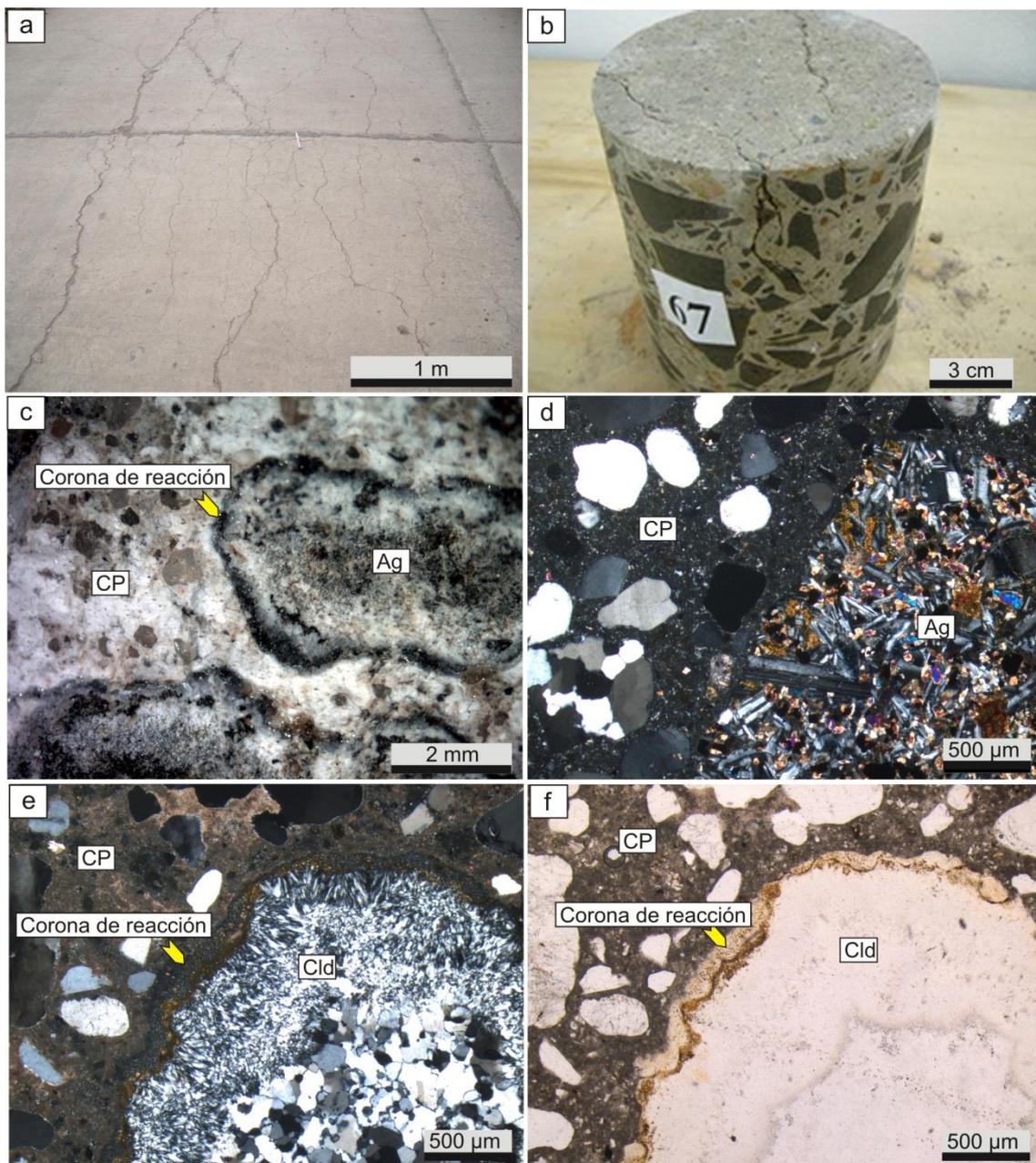


Figura 7.2. a. Fisuras longitudinales en las losas de hormigón. b. Testigo de hormigón con fisuras horizontales y verticales ramificadas. c. Halos de reacción en los agregados gruesos y material blanquecino asociado. d-f. Fotomicrografías del hormigón. d: agregado grueso basáltico y pasta de cemento no carbonatada (NX). e y f: agregado grueso de calcedonia y cuarzo microcristalino con halo de reacción (NX). d y e: Nícoles cruzados. f: Luz paralela CP: Cemento portland; Ag: agregado grueso; Cld: calcedonia.

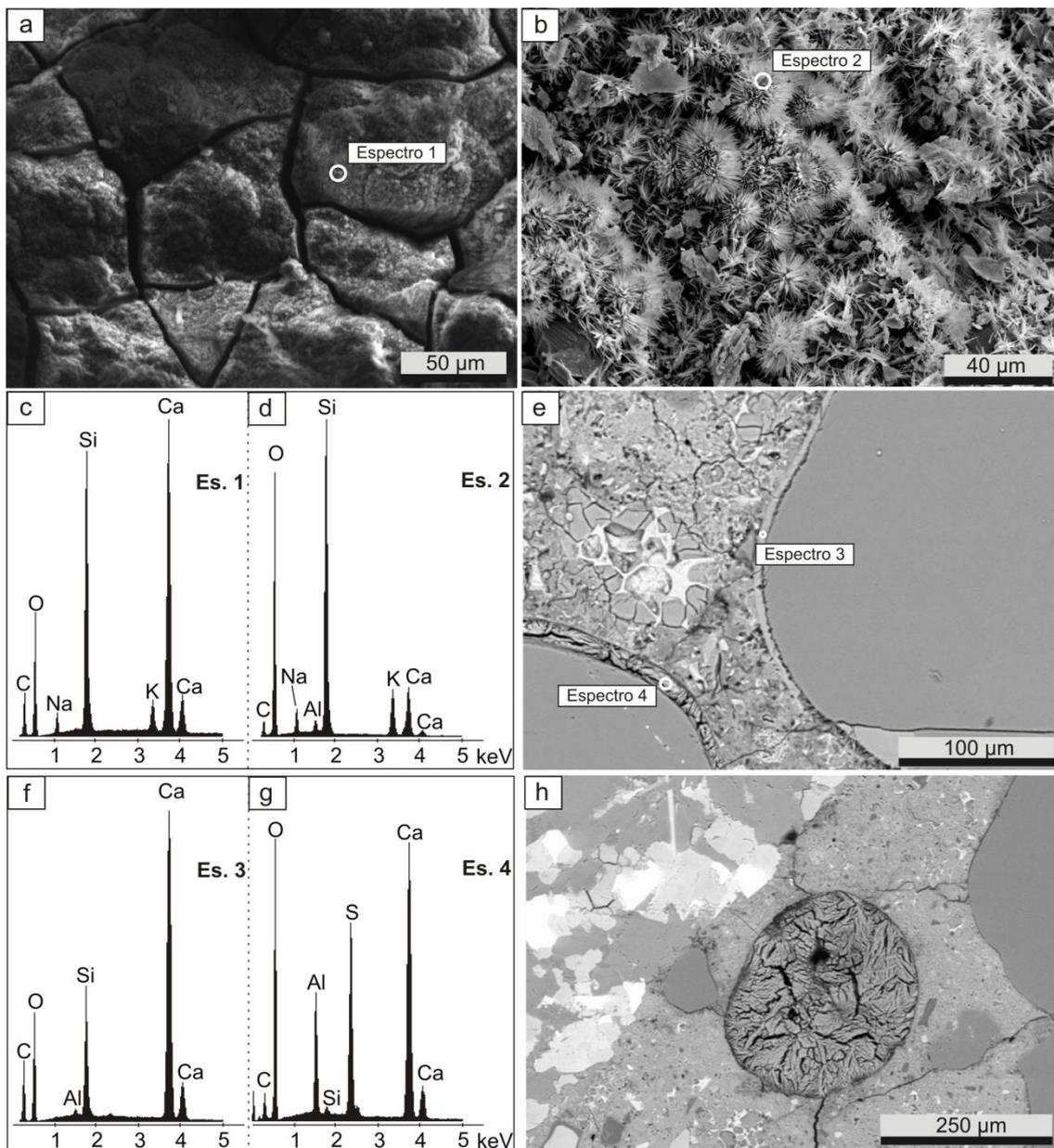


Figura 7.3. SEM-EDS. a. Imagen de electrones secundarios del material amorfo craquelado. b. Imagen de electrones secundarios del material cristalino fibroso dispuesto de forma radial. c.

Espectro de EDS del sector 1. d. Espectro de EDS del sector 2. e. Imagen de electrones retrodispersados de un sector del mortero. f. Espectro de EDS del sector 3. g. Espectro de EDS del sector 4. h. Imagen de electrones retrodispersados de una cavidad rellena de ettringita.

7.2 Pavimento de hormigón (aeropuerto de la ciudad de Corrientes)

El aeropuerto se ubica sobre la ruta nacional N°12, a 5 km al norte de la ciudad de Corrientes. En la Figura 7.4 se puede observar una imagen satelital de la calle de rodamiento que vincula la plataforma de estacionamiento de aviones con la pista.



Figura 7.4. Ubicación de la obra estudiada.

7.2.1 Características de la obra e inspección visual

El sector estudiado corresponde a la calle de rodamiento que vincula la plataforma de estacionamiento de aviones con la pista. Presenta un ancho de 24 metros por 250 metros de largo, conformado por losas de 4,0 metros de largo y de 3,0 metros de ancho. En dicho pavimento se diferenciaron losas de hormigón correspondientes a la obra original y losas de reparación. El agregado grueso del hormigón de las primeras es un canto rodado polimíctico, mientras que el de las losas de reparación corresponde a una piedra partida basáltica. Estas últimas fueron las seleccionadas para el estudio. El espesor de las losas oscila entre 31 cm y 36 cm con un valor medio de 33,2 cm.

En la tabla 7.4 se presentan los resultados obtenidos de la inspección visual.

Tabla 7.4. Inspección visual del pavimento de hormigón (Aeropuerto Corrientes).

Grado de fisuramiento: L= leve; M= moderado; S= severo.

Estructura	Presencia de fisuras			Observaciones
	tipo mapa asignable a contracción del mortero de superficie	contracción plástica o autógena	tipo mapa asignable a fenómenos deletéreos tipo RAS	
Calle de rodamiento entre plataforma y pista	SI-M	NO	SI-S/M	Fisuras superficiales "tipo mapa" a nivel del mortero de terminación en grado moderado con extensión longitudinal asignables a fenómenos deletéreos del tipo RAS en grado severo y moderado

El estado de fisuración en la mayoría de las losas resulta moderado. Aquellas asignadas a fenómenos de RAS poseen distribución errática tipo mapa aunque en algunos sectores se orientan preferentemente en dirección longitudinal. La presencia de material de exudación blanquecino en las fisuras, es frecuente (Figura 7.5.a).

Al igual que en el caso anterior se extrajeron testigos conforme a las recomendaciones establecidas en la norma IRAM 1551 (2000). En la inspección visual, se reconoció la presencia de oquedades en un grado leve, reflejando condiciones de compactación aceptables para el tipo de estructura. No se observan signos de segregación y la distribución de los componentes principales (agregado grueso y mortero) es homogénea. El agregado grueso presenta un tamaño máximo de ~ 37,5mm. Algunos testigos presentan fisuras erráticas tipo "mapa" en superficie, concentradas en la delgada capa de mortero superficial del pavimento sin penetrar en profundidad. Las mismas son atribuibles a fenómenos superficiales de contracción. Algunos testigos presentan fisuras superficiales en la masa asociadas a la RAS con material blanquecino exudado. Estas se desarrollan preferentemente según planos horizontales intersectados por fisuras verticales que presentan ramificaciones (Figura 7.5.b) algunas

de las cuales atraviesan el agregado. Se observan coronas de reacción en torno a las partículas del agregado grueso con exudación de productos blanquecinos asociados (Figura 7.5.c). La pasta se observa carbonatada y las cavidades de aire accidental generalmente rellenas parcial o totalmente de ettringita (Figura 7.5.d). En la Tabla 7.5 se resumen los resultados de la observación visual de los testigos.

Tabla 7.5. Resultados de la observación visual en testigos. D: Fisuras por fenómenos deletéreos o problemas de durabilidad. FV-P: fisura vertical pasante; FH: fisura horizontal; FV-NP: fisura vertical no pasante; FH: fisura horizontal. Grado: L= leve; M= moderado; S= severo.

Características	Tipo/Nº de testigos	Grado/Nº de testigos
Fisuras superficiales	D/5	S/4, L/1
Fisuras masa	D/4. (FV-P1, FV-NP/3, FH/4)	S/3, M/1
Oquedades	Sí en todos los testigos	S/1,L4
Segregación	No se observó	

En la tabla 7.6 se indican los resultados de las propiedades físicas determinadas sobre los testigos y submuestras obtenidas a partir de los mismos.

Tabla 7.6. Propiedades físicas determinadas en testigos y submuestras.

Testigo/ muestra	Densidad seca	Densidad saturada superficie seca	Absorción	Porosidad	Pérdida por calcinación	Contenido unitario de agregado fino seco	Contenido unitario de agregado grueso seco
	Ds	Dsss	A	P	PxC	CUAF	CUAG
	[Kg/m ³]	[Kg/m ³]	[%]	[%]	[%]	[Kg/m ³]	[Kg/m ³]
1/a	2351	2482	5,6	13,1	4,3	820	1112
1/b	2381	2498	4,9	11,7	4,1	827	1153
2/a	2348	2476	5,5	12,8	4,4	893	1023
2/b	2387	2504	4,9	11,7	4,1	889	1115
3/a	2251	2403	6,8	15,2	5,0	1023	771
3/b	2348	2478	5,5	13,0	4,0	853	1100
4/a	2294	2425	5,7	13,0	3,7	796	951
4/b	2284	2417	5,8	13,3	3,8	931	1124

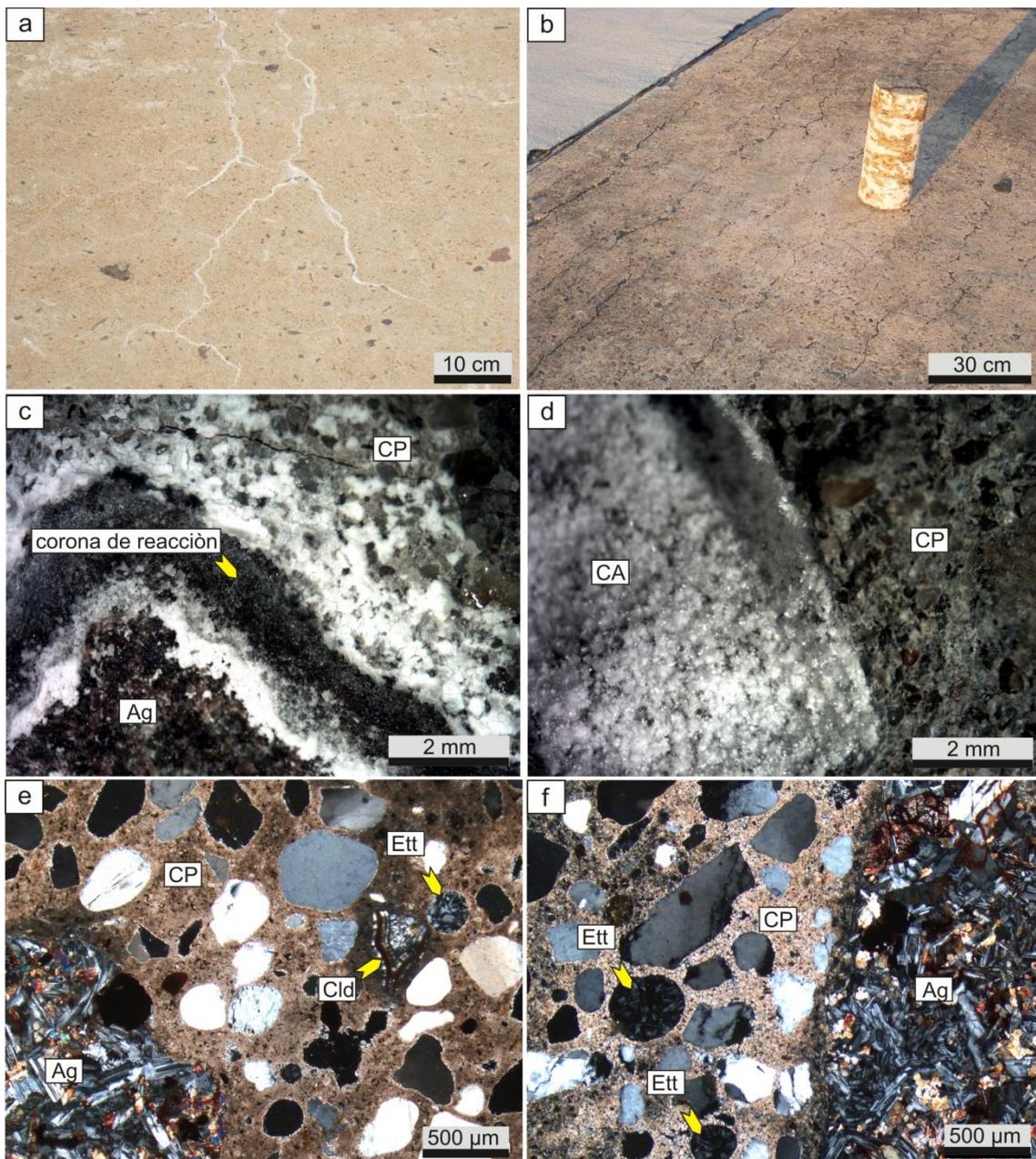


Figura 7.5.a. Fisuras superficiales por RAS con material exudado blanquecino. b. Testigo de hormigón con fisuras horizontales y verticales ramificadas. c. Halo de reacción en agregado basáltico y material blanquecino asociado. d. Ettringita relleno parcialmente una cavidad de aire accidental. e-f. Fotomicrografías del hormigón. e. agregado grueso basáltico en contacto con la pasta de cemento muy carbonatada (NX). f. agregado grueso basáltico con borde de reacción oscuro, pasta fuertemente carbonatada y cavidades rellenas completamente con ettringita. e y f: Nícoles cruzados. CP: Cemento portland; Ag: agregado grueso; Cld: calcedonia; Ett: ettringita; CA: cavidad de aire accidental.

7.2.2 Características petrográficas y SEM-EDS

El agregado grueso está constituido por la piedra basáltica de la cantera "L.D". El 60 % de los agregados gruesos presentan fuerte desarrollo de óxidos/hidróxidos de hierro, otorgándoles coloración pardo-rojiza. El agregado fino es una arena natural compuesta por cuarzo, areniscas silíceas, areniscas ferruginosas y calcedonia.

Los agregados presentan escasos bordes de reacción, sin embargo la característica principal del hormigón estudiado es la fuerte carbonatación de la pasta de cemento y la presencia de ettringita, ampliamente distribuida como relleno de fisuras y espacios vacíos.

Por SEM-EDS se observa que el material blanquecino asociado a las coronas de reacción es de aspecto masivo y agrietado tipo gel (Figura 7.6.a) y corresponde a un silicato de calcio, probablemente hidratado (Figura 7.6.d). En el interior de los agregados gruesos se observan algunas fisuras rellenas de un material de grano fino que se craquela fácilmente (Figura 7.6.b). Hacia ambos lados de la fisura, el material está compuesto por un silicato de calcio con cantidades menores de aluminio, hierro, sodio y potasio (Figura 7.6.e). Hacia el interior de la fisura el material posee similar composición, aunque un menor contenido de hierro y más calcio (Figura 7.6.f). En la interfase pasta-agregado (Figura 7.6.c) también se reconoce un material de composición similar (Figura 7.6.g). Las cavidades están rellenas de ettringita (Figura 7.6.h).

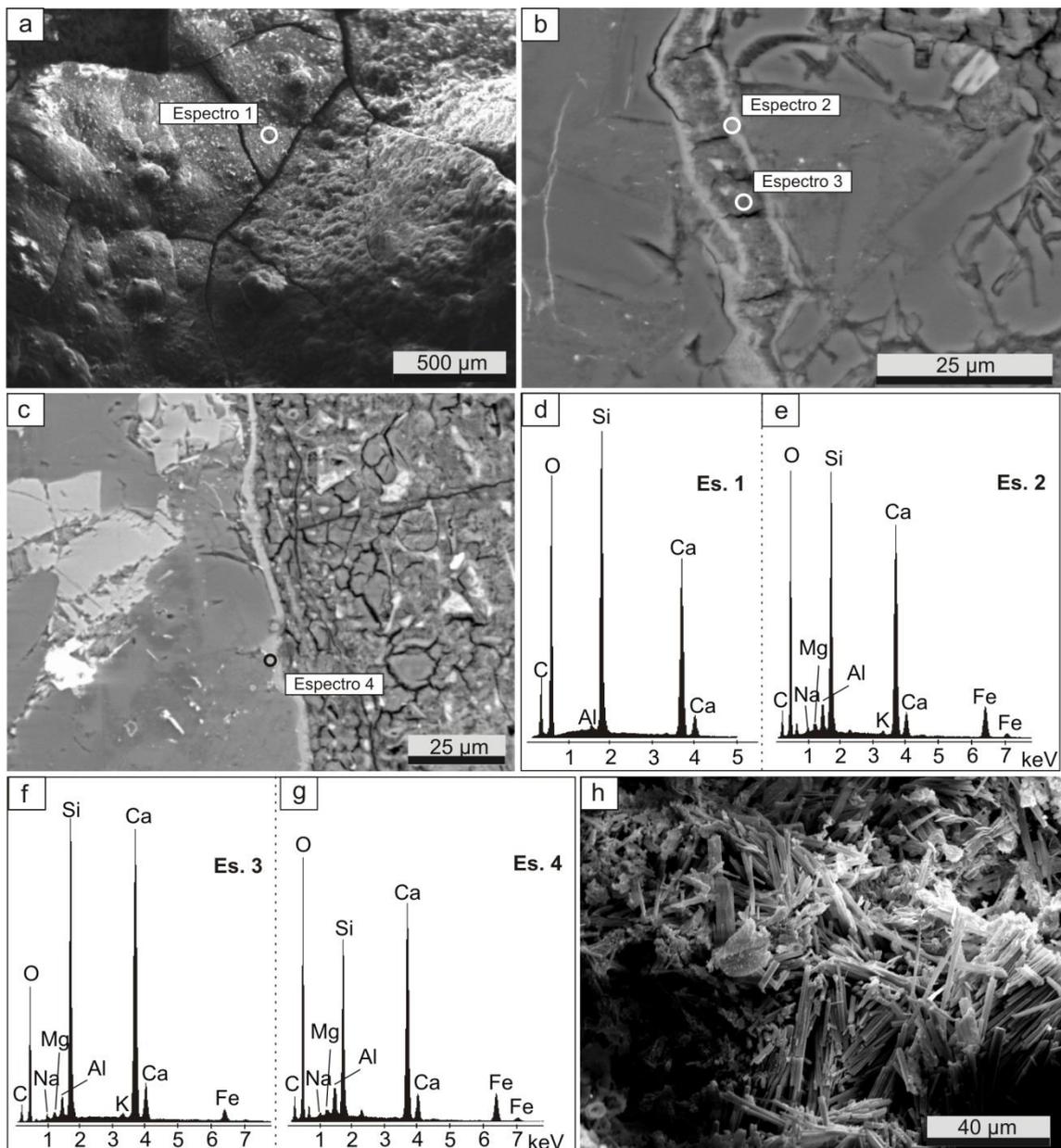


Figura 7.6. SEM-EDS. a. Imagen de electrones secundarios del material amorfo craquelado. b. Imagen de electrones retrodispersados de una fisura rellena en el interior del agregado basáltico. c. Imagen de electrones retrodispersados de la interfase pasta-agregado basáltico. d. Espectro de EDS del sector 1. e. Espectro de EDS del sector 2. f. Espectro de EDS del sector 3. g. Espectro de EDS del sector 4. h. Imagen de electrones secundarios de una cavidad rellena de ettringita.

7.3 Discusión y consideraciones finales

En las dos estructuras de hormigón estudiadas se determinó la presencia de la RAS aunque en diferentes grado de intensidad. El pavimento de hormigón de la ciudad de Curuzú Cuatiá posee buenas características físicas, presenta elevada densidad y baja porosidad y absorción, lo que se encuentra en consonancia con la baja carbonatación de la pasta. Se reconoció escaso material de neoformación en las zonas de interfase pasta-agregado grueso y en las cavidades de aire accidental. Se observaron productos masivos y agrietados tipo gel y fibrosos radiales, determinados como silicatos de calcio, sodio y potasio atribuibles a la RAS. También se identificó ettringita en microfisuras y cavidades de airea accidental Se considera que la utilización de los agregados basálticos de la cantera “L.M”, los cuales presentan valores de vidrio cercanos al límite máximo normativo, en conjunto con la presencia de areniscas silíceas en el agregado fino, calificadas como potencialmente reactivas por la presencia de ópalo y sílice criptocrystalina en el cemento de los granos de cuarzo, habrían contribuido al marcado deterioro de la estructura. Estos últimos componentes habrían sido determinantes para el desarrollo de la RAS. Se suma a este proceso el efecto de la presencia de arcillas expansibles que también habrían participado de los procesos expansivos.

El pavimento de hormigón ubicado en el aeropuerto de Corrientes, presenta menor densidad, mayor absorción y porosidad, lo que queda evidenciado en la fuerte carbonatación de la pasta y la gran distribución de ettringita en fisuras y espacios vacíos. Si bien para su construcción se utilizaron los agregados de la cantera “L.D” calificadas como no reactivos tanto en el examen petrográfico como en los ensayos de expansión sobre prismas, la menor calidad del hormigón habría favorecido el ingreso de humedad en la estructura para que reaccione el poco vidrio de la roca en conjunto con el cuarzo microgranular de la mesostasis y la calcedonia presente en el agregado fino, siendo fuentes suficientes para el desarrollo de los productos de neoformación asociados a la RAS. Sin embargo, en esta estructura la RAS no parece ser la causa del deterioro inicial sino una consecuencia de la pérdida de calidad del hormigón.

CAPÍTULO 8

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

8.1 Consideraciones

8.1.1 Importancia de los estudios llevados a cabo

Las provincias de Entre Ríos y Corrientes son dos grandes productoras de agregados pétreos de la región mesopotámica y alrededores para la industria de la construcción. Gran cantidad de este material es utilizado en las obras locales. En la región se explotan potentes coladas de rocas basálticas, pertenecientes a la Formación Serra Geral. La naturaleza de este tipo de rocas, al ser utilizados como agregados pétreos, puede desencadenar reacciones deletéreas en contacto con los álcalis del cemento dando lugar a la reacción álcali-sílice (RAS). La presencia de vidrio volcánico en la pasta (fresco o parcialmente desvitrificado) como material potencialmente reactivo, y de arcillas de tipo esmectítica, como sustancia nociva pueden contribuir al desarrollo de esta reacción.

Si bien se conocen los factores para evitar la RAS, actualmente se siguen registrando casos de daño en obras ingenieriles, donde se utilizó este tipo de agregados. El estudio de la potencial reactividad de las rocas y su comportamiento en ensayos de laboratorio vs casos de estudio, es una herramienta fundamental, para poder predecir el comportamiento de estas rocas cuando son utilizadas en el hormigón, motivo que inicio la investigación sobre la reactividad en este tipo de triturado pétreo provenientes del sector noroeste del país, provincias de Entre Ríos y Corrientes.

8.1.2 Petrografía y geoquímica de las rocas estudiadas

El estudio regional de estos basaltos, permitió demostrar la existencia de variaciones tanto en la distribución como en la geoquímica de las vulcanitas.

Las 5 canteras relevadas presentan variaciones tanto en su mineralogía y textura, como en su impronta geoquímica. De acuerdo a su clasificación en base a elementos mayoritarios las rocas pertenecen a basaltos de carácter toleítico, ricos en hierro. Sin embargo en el diagrama de clasificación TAS, las canteras "L.D" y "Y" se desplazan hacia el límite intermedio, basalto andesítico, con valores de SiO₂ mayores. En función de la relación MgO - FeO_t - Al₂O₃ todas las rocas pertenecen a basaltos de tipo continental. En base al análisis de los elementos traza las canteras, se ubican en su mayoría dentro del campo de basaltos alcalinos de intraplaca (WPT), sólo las muestras de las canteras "L.D" y "Y" se ubican en el campo de basaltos calco-alcalinos (CAB). Analizando la relación Zr vs. K, para determinar el grado de alteración que presentan las rocas, nuevamente las canteras "L.D" y "Y" se separan del resto, alejándose de la recta teórica propuesta en el diagrama. Por lo cual se puede estimar que la variación en la geoquímica es atribuible a los procesos de alteración que han sufrido las rocas.

El contenido de TiO₂ ha sido propuesto como discriminador de las rocas de Paraná considerándose en función de su porcentaje: basaltos de bajo (< 2%, LTiB) o alto titanio (> 2%, HTiB). De acuerdo a esta clasificación, los magmas estudiados en el presente trabajo fueron clasificados como de alto HTi (TiO₂ > 3%) a excepción de las canteras "L.D" y "Y" que representarían la transición entre los HTi y los LTi. Las Canteras "L.A" y "L.M" registran valores de TiO₂ ≥ 3,5% (magma tipo Urubici/Pitanga); la cantera "P.Y" tiene valores de TiO₂ cercanos a 3,1% (magma tipo Pitanga/Paranapanema) y Las canteras "L.D" y "Y" registran los valores más bajos de TiO₂, varían entre 1,3% y 1,9% (magma tipo Ribera/Esmeralda).

La ubicación de las canteras y sus características mineralógicas y geoquímicas están estrechamente relacionadas. Las canteras "L.A" y "L.M", localizadas muy próximas entre sí, son muy homogéneas petrográficamente. Las rocas presentan textura intersertal a intergranular, con tamaños de grano que varían entre 250µm y 500µm. Ambas se caracterizan por tener autolitos de mayor desarrollo cristalino y de escasa a moderada alteración en sus componentes. Sin embargo "L.A" tiene mayor contenido

de vidrio volcánico relíctico, lo cual es consistente con su comportamiento en los ensayos de reactividad potencial.

Las canteras “L.D y “Y” se ubican en cercanías a la localidad de Yofre. Si bien el tamaño de grano es levemente distinto, en ambas se identificó sanidina en los interespacios cristalinos y el intercrecimiento con cuarzo microgranular, dando lugar a la formación de texturas poquilíticas y micrográficas.

La roca de la cantera “P.Y” ubicada en la provincia de Entre Ríos, es la de mayor tamaño de grano, la que presenta mayor alteración y variación textural. En ella se analizaron testigos de perforación donde se registraron niveles con intercalaciones de areniscas, niveles vesiculares con zeolitas, arcillas, venillas de calcita y también niveles vítreos.

El análisis de los minerales de alteración se realizó sobre un basalto vesicular perteneciente a la cantera “Y”, Las amígdalas representan gran parte del total de la roca y en ocasiones están parcial o totalmente rellenas con, dos tipos de esmectitas, una verdosa que suele localizarse en las zonas de borde, y otra blanquecina localizada en el interior de las mismas. Este tipo de alteración se registró en varios niveles de las distintas canteras, como por ejemplo en “P.Y”. La esmectita verdosa presenta hábito laminar a fibroso de grano fino ($\leq 20\mu\text{m}$) formando abanicos y la blanquecina con textura en “honeycomb”. La química mineral ubicó a la primera en el campo de la saponita (trioctaédrica), mientras que la blanquecina se asocia a la serie beidellita-montmorillonita (dioctaédricas). Esta asociación beidellita-saponita podría vincularse a procesos hidrotermales.

Las canteras “Y” y “P.Y” presentan de niveles de arenisca constituida por clastos de cuarzo redondeado, cementado por sílice criptocristalina, que se encuentran en ocasiones intercaladas con el basalto. En la cantera “Y” se encuentra en el techo del nivel superior y, si bien es un material que se descarta en el momento de la explotación, se reconocieron venillas en el basalto subyacente, que podría contribuir a

la reactividad potencial de la roca que se explota. El caso de la cantera "P.Y" es más complejo, ya que la arenisca se encuentra intercalada en niveles de poca potencia en varios sectores.

8.1.3 Reactividad de las muestras estudiadas y evaluación de las normativas

Según los resultados del examen petrográfico IRAM 1649 (2008) y los requerimientos establecidos por la norma IRAM 1531 (2012) solo la muestra de la cantera "L.A" se califica como potencialmente reactiva superando el límite de 3% de vidrio volcánico. En función al contenido de sílice disuelta todas las rocas, a excepción de la cantera "L.D" (7mg), arrojaron valores superiores a 20mg. Las canteras "L.A" y "L.D" son las que dieron los mayores valores (52,6 y 48,5, respectivamente).

El ensayo de prisma de hormigón convencional (38°C) y acelerado (60°C) (IRAM 1700, 2012) muestran tendencias similares. En el método convencional, al cabo de 52 semanas las muestras "P.Y" y "L.A" superan el límite máximo de 0,04% de expansión. En coincidencia, en el método acelerado, se puede observar que los agregados de la cantera "P.Y" y "L.A" superan el límite establecido en la semana 13. En ambas muestras se observa un comportamiento similar alcanzando un periodo de estabilización a partir de la semana 15. Cabe destacar que el agregado "L.M" presenta un valor muy cercano al límite, con una expansión de 0,039. Al extender el ensayo a las 20 semanas, la muestra sigue expandiendo hasta superar el límite establecido, por lo cual debería ser considerado como potencialmente reactivo frente a la RAS.

Por otro lado, el ensayo acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (1997) da expansiones mayores del 0,10% a la edad de 16 días, calificando a todos los agregados estudiados como potencialmente reactivos. Sin embargo las muestras "L.A" y "P.Y" duplican los valores de expansión en comparación con el resto, con pendientes mucho más pronunciadas en el gráfico de expansión vs edad, en los primeros días de ensayo. Al extender el ensayo a 28 días se observa que todas las curvas continúan la tendencia creciente en los valores de expansión.

La expansión de la arenisca medida en la barra de mortero fue 0,357 % a los 16 días calificando al material como potencialmente reactivo. Al extender el tiempo de ensayo a 28 días, la expansión sigue aumentando sin mostrar estabilización.

Haciendo un análisis comparativo entre los resultados, la correlación entre la sílice disuelta y la expansión en las barras de mortero, es = 0,81. Casi todas las muestras (a excepción de "L.D", en la sílice disuelta) califican como potencialmente reactivas. Las correlaciones con los resultados de expansión en los prismas de hormigón son más bajas ($R^2 = 0,74$ y $0,65$ para el ensayo acelerado y convencional respectivamente). Sin embargo, las muestras que dieron mayor expansión son las que liberaron en general más sílice en el ensayo químico. Una excepción es la de la muestra "L.D." con valores muy bajos de sílice disuelta (7 mg), que presentó expansiones similares que "Y" que dio valores de sílice que triplican a "L.D" (21,9mg).

Del análisis de estos datos, surge la incertidumbre del comportamiento conocido como "falso positivo" o "falso negativo". Esto ocurre en el caso de la muestra "L.M" que arrojó valores de expansión en el prisma acelerado muy cercanos al límite (0,039%) a las 13 semanas, superando el límite si se extiende el ensayo a 20 semanas. Sin embargo la misma, no supera el límite en el ensayo convencional. Este comportamiento estaría dando un "falso negativo". De igual modo el ensayo de la barra de mortero estaría arrojando "falsos positivos" sobreestimando el comportamiento de aquellos agregados que son inocuos frente a los demás métodos.

A pesar de las diferencias entre los resultados obtenidos en los ensayos, existe una relación en la potencial reactividad de cada cantera, que se mantiene con escasa variación.

Ensayo	Grado de reactividad
Sílice disuelta (mg) IRAM 1650	L.A > P.Y > L.M > Y > L.D
Expansión (%) según IRAM 1700 a 38°C	P.Y > L.A > L.M > Y > L.D
Expansión (%) según IRAM 1700 a 60°C	P.Y > L.A > L.M > Y > L.D
Expansión (%) según IRAM 1674	P.Y > L.A > Y > L.M > L.D

No se encontró correlación entre el contenido de vidrio y la expansión medida en los ensayos físicos (barras de mortero y prismas convencional y acelerado). Esto podría deberse a que en algunas muestras el vidrio se encuentra parcialmente alterado sin llegar a formar minerales arcillosos, pero contribuyendo a la potencial reactividad.

8.1.4 Casos de estudio

Las dos obras estudiadas corresponden a pavimentos de hormigón (pavimento urbano de la localidad Curuzú Cuatiá y calle de rodamiento del aeropuerto de la ciudad de Corrientes) con diferente grado de fisuración atribuibles a la RAS, que afectaron su durabilidad. Ambas estructuras están realizadas con agregados gruesos basálticos de la zona.

La estructura más dañada pertenece al pavimento urbano donde la mayoría de las losas presentan un estado de fisuración moderado a severo. Se identificaron fisuras asignadas a fenómenos de RAS, con distribución errática tipo mapa, varias de ellas con exudación de material color blanquecino, fisuras por contracción a nivel del mortero y otras de terminación en la superficie del pavimento. La masa del hormigón presenta características homogéneas. Del análisis petrográfico se determinó que la piedra partida que se utilizó corresponde a la cantera "L.A". Este agregado fue el único calificado como potencialmente reactivo en el examen petrográfico, el método acelerado de prisma de hormigón y la barra de mortero. En el agregado fino se identificó una arenisca silícea con cemento de sílice criptocristalina que podría haber contribuido al desarrollo de la RAS.

El pavimento de hormigón ubicado en el aeropuerto de Corrientes, presenta un estado de fisuración moderado, en la mayoría de las losas. Las fisuras asignadas a fenómenos de RAS poseen distribución errática tipo mapa aunque en algunos sectores se orientan preferentemente en dirección longitudinal. La presencia de material de exudación blanquecino, es frecuente. Este pavimento se realizó con agregados de la cantera

“L.D”, que tuvo un comportamiento inocuo en todos los ensayos, a excepción de la barra de mortero (menor valor registrado del ensayo, 0,20%).

8.2 Conclusiones

- Las rocas analizadas corresponden a basaltos toleíticos ricos en hierro (canteras “P.Y” “L.M” y “L.A”) y andesíticos (“L.D” y “Y”), de tipo continental. En base al análisis de los elementos traza las primeras corresponden a basaltos alcalinos de intraplaca (WPT), mientras que “L.D” y “Y” se ubican en el campo de basaltos calco-alcalinos (CAB).
- De acuerdo al contenido de titanio fueron clasificados como de alto HTi ($TiO_2 > 3\%$) a excepción de las canteras “L.D” y “Y” que representarían la transición entre los HTi y los LTi.
- El examen petrográfico del triturado 6mm-20mm califica a todos los agregados estudiados como inocuos, a excepción de la muestra de la cantera “L.A”, debido a que contiene más de 3% de vidrio.
- De acuerdo al contenido de sílice disuelta solo la muestra de la cantera “L.D” presentó valores inferiores a 10 mg.
- Todas las muestras ensayadas según el método acelerado de la barra de mortero, experimentaron expansiones mayores al 0,10% a los 16 días. Según estos resultados todos los agregados se califican como potencialmente reactivos.
- Los valores de expansión en el prisma de hormigón convencional fueron inferiores a 0,04% a las 52 semanas, para las canteras “L.M”, “L.D” e “Y”. A pesar de que las muestras ensayadas en el método acelerado del prisma de hormigón dieron resultados similares, con expansiones de 0,08% y 0,05% para las muestras “P.Y” y “L.A”, en el caso del agregado “L.M” el valor de expansión (0,039%) es muy cercano al límite normativo.

- El método del prisma de hormigón (convencional y acelerado) fueron los que arrojaron los mejores resultados dentro de los ensayos físicos para evaluar este tipo de rocas, considerando su comportamiento en los casos de estudio. Por su parte el método de barra de mortero arroja resultados falso positivos calificando a todos los agregados como potencialmente reactivos.
- La correlación del método químico y los ensayos físicos, presentan buen ajuste de tendencias cuando se comparan los resultados.
- En algunas muestras se observó vidrio parcialmente alterado sin llegar a formar minerales arcillosos. Esto debería ser considerado en la normativa vigente, particularmente para los agregados de origen volcánico, ya que se trata de un material susceptible a reaccionar con los álcalis y difícil de cuantificar al microscopio óptico.
- El análisis con microscopía UV sobre secciones delgadas en barras y prismas de hormigón, luego de cumplido el tiempo de ensayo es una herramienta complementaria, útil para evaluar el grado de deterioro en función al desarrollo de microfisuras. Si bien el área del microscopio sobre la que se realizan las determinaciones es pequeña, la correlación entre el área fisurada (%) y la expansión en los ensayos físicos fue buena.
- La reactividad alcalina potencial determinada en los ensayos de laboratorio fue confirmada en dos casos de estudio, donde se utilizaron agregados de la región, que evidenciaron RAS.

8.3 Recomendaciones

Debido a la heterogeneidad textural y mineralógica y al grado de alteración variable que presentan las coladas, se recomienda realizar ensayos periódicos para evaluar la potencial reactividad del material de los frentes de explotación.

En las zonas de cantera donde se reconozca la presencia de areniscas deberían realizarse ensayos adicionales para analizar el efecto pessimum, según la proporción en la que se encuentre presente dentro del basalto que se explota.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. INSUGEO, Ed. Magna Publicaciones, 160p.
- Aceñolaza, F.G. y Sayago, J.M. 1980. Análisis preliminar sobre la estratigrafía, morfodinámica y morfogénesis de la región de Villa Urquiza, provincia de Entre Ríos. *Acta Geológica Lilloana*, 15(2), 139-154.
- ACI Committee 201. 1968. Guide for making a conditions survey of concrete in service. *American Concrete Institute Journals*, 1:68-79.
- Alaejos, P. y Bermúdez, M.A. 2003. Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Monografía, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 76: 168p.
- Astarloa, U.M. 1949. La destrucción de los pavimentos de hormigón y sus causas. *Revista Caminos*, Buenos Aires: 8-10.
- ASTM C227. 2010. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method). *Annual Book of ASTM Standards (04.02)*, 6p.
- ASTM C289. 2007. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method). *Annual Book of ASTM Standards (04.02)*, 7p.
- ASTM C295.2012. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. *Annual Book of ASTM Standards (04.02)*, 9p.
- ASTM C1260. 2014. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). *Annual Book of ASTM Standards (04.02)*, 5p.
- ASTM C1293. 2008. Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. *Annual Book of ASTM Standards (04.02)*, 7p.
- Avid, F.A., Paez, G., Cosentino, J. y Sota, J.D. 2014. La durabilidad de los basaltos de la Mesopotamia en los hormigones de cemento portland. 2º Congreso Argentino de Áridos, Bueno Aires, 11p.
- Batic, O. y Falcone, D. 2010. RAS. Antecedentes para normalizar un método acelerado de prismas de hormigón a 60°C. VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. CINPAR, Córdoba, 10p.
- Batic, O., Falcone, D., Milanesi, C. y Violini, D. 2010. Evaluación de la reactividad de los agregados: Avances en la aplicación de un método acelerado del prisma de hormigón. *Revista Hormigón*, 48:7-16.

- Batic, O., Maiza, P. y Sota, J. 1994. Alkali silica reaction in basaltic rocks NBRI method. *Cement and Concrete Research*, 24(7):1317-1326.
- Batic, O. y Milanesi, C. 1995. Consideraciones sobre el método de expansión de prismas de hormigón al estudio de la reactividad alcalina de los agregados. XII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Argentina: 149-162.
- Batic, O. y Sota, J. 2001. Reacciones deletéreas internas. Durabilidad del Hormigón Estructural. AATH, La Plata, Buenos Aires, Argentina: 157-216.
- Batic, O., Sota, J. y Falcone, D. 2008. Caracterización de los agregados de nuestro país frente a la RAS. I Congreso Argentino de Áridos y VI Jornadas Iberoamericanas de materiales de construcción, Mar del Plata, 1:419-426.
- Beaufort, D., Papapanagiotou, P., Patrier, P., Fujimoto, K. y Kasai, K. 1995. High temperature smectites in active geothermal field. Kharaka, Y. K. y Chudaev, O. V. (Eds.). 8th Int. Symp. Water-Rock Interact: 493-496.
- Bellieni, G., Brotzu, P., Comin-Chiaramonti P., Ernesto, M., Melfi, A., Pacca, I., Piccirillo E. y Stolfi, D. 1984a. Flood basalt to rhyolite suites in the southern Paraná plateau (Brasil): paleomagnetism, petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Petrology*, 25: 579-618.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L., Melfi, A., Piccirillo, E., Nardy A. y Roisemberg, A. 1984b. High and low-TiO₂ flood basalts from the Paraná plateau (Brasil): Petrology and geochemical aspects bearing on thier mantle origin. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 5. Abhandlungen, 150: 273-306.
- Bérubé, M.A. y Fournier, B. 1992. Accelerated test methods for alkali-aggregate reactivity. *Advances in Concrete Technology*: 583-627.
- Bérubé, M.A. y Fournier, B. 1993. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 15(1-2):27-47.
- Bérubé M.A., Fournier, B., Dupont, N., Mongeau, P. y Frenette, J. 1992. A simple autoclave mortar bar method for assessing potential alkali-aggregate reactivity in concrete. *Proceeding of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Ed by The Concrete Society, London, 81p.
- Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. Colección Ciencias, N°2. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 419p.
- Boynton, W.V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed.). *Rare Earth Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam: 63-114.

- Bravard, A. 1858. Monografía de los terrenos marinos terciarios de las cercanías del Paraná. Imprenta del registro oficial. (Reimpresión Imprenta del Congreso de La Nación, 1995). Paraná, 107p.
- Brunatti, C y Souza, E. 2011. El hormigón y el ambiente. Revista Hormigonar, 25, 6p.
- Candela, A.M., Noriega, J.I. y Reguero, M.A. 2007. The first Pliocene mammals from the northeast (Mesopotamia) of Argentina: biostratigraphic and paleoenvironmental significance. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 27(2): 476-483.
- Cann, J.R. 1970. Rb, Sr, Y, Zr, Nb in some ocean floor basaltic rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 10: 7-11.
- Chaiken, B. y Halstead, W.J. 1960. Correlation between chemical and mortar bar test for potential alkali reactivity of concrete aggregate. *Highway Research Board Bulletin*, 239:24-40.
- Chebli, G., Mozetic, M.E., Rossello, E.A. y Bühler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura chacopampeana. En: Caminos, R. (ed.) *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires. *Anales* 29 (20): 627-644.
- CIRSOC 201. 2005. Reglamento argentino de estructuras de hormigón. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), del Sistema INTI, 482p.
- Cobbold, P., Massabie, A., y Rossello, E., 1986. Hercynian wrenching and thrusting in the Sierras Australes foldbelt, Argentina. *Hercynica*: 135-148.
- Comin-Chiaramonti, P., Cundari, A., DeGraff, J.M., Gomes, C. B. y Piccirillo, E.M. 1999. Early Cretaceous–Tertiary magmatism in Eastern Paraguay (western Paraná basin): geological, geophysical and geochemical relationships. *Journal of Geodynamics*, 28(4): 375-391.
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1966. Su creación, su funcionamiento y la labor realizada. Simposio LEMIT y Jornadas de Ingeniería Estructural. Caracas, Venezuela
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1967. Estudio de la reactividad potencial de los áridos de posible utilización en la presa Agua del Toro. II Simposio de Ligantes Hidráulicos, LEMIT.
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1968. Investigación de la reactividad potencial con los álcalis de los cementos, de los agregados utilizados en las obras del Gran Buenos Aires y en una parte del litoral del Norte Argentino. VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Mar del Plata, 4: 273-280.
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1972a. Agregados investigados. Resumen de resultados. Arenas.

- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1972b. La reacción álcali-agregado. Su implicancia actual en la República Argentina. VII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 4:167-172.
- Comisión de Estudio de la Reacción Álcali-Agregado. 1972c. Resumen de resultados. Agregados gruesos.
- CSA-A23.2-14A. 2014. Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms. Canadian Standards Association, 207p.
- CSA-A23.2-25A. 2014. Test method for detection of alkali-silica reactivity aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Canadian Standards Association, 240p.
- Davidson, W.H. 1973. The influence of constitution on the engineering properties of crushed volcanic breccia. Sixth Conference of the Australian Road Research Board, 17 (593 Tech Note).
- De Alba, E. y Serra, N. 1959. Aprovechamiento del río Uruguay en la zona de Salto Grande: Informe sobre las Condiciones y Características Geológicas. Anexo 1 (b), (11): 287-310.
- Ernesto, M., Raposo, M.I.B., Marques, L.S., Renne, P.R., Diogo, L.A y De Min, A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Northeastern paraná magmatic province: tectonic implications. J. Geodyn., 28: 321-340.
- Dent Glasser, L. y Kataoka, N. 1981. The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction. Cement and Concrete Research, 11:1-9.
- Diamond, S. 1981. Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ash pastes. Cement and Concrete Research, 11(3):383-394.
- Esteves, H., Fernandes, I., Janeiro, A., Silva, A.S., Pereira, M., Medeiros, S. y Nunes, J. C. 2017. Potentially reactive forms of silica in volcanic rocks using different analytical approaches. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95, 9p.
- Falcone, D., Sota, J. y Batic, O. 2008. Discusión sobre métodos para evaluar agregados potencialmente reactivos. Rahhal, V., Sota, J.D. (Eds.), III Congreso Internacional de la AATH- 17ª Reunión Técnica, Córdoba, Argentina: 329-336.
- Falcone, D. y Batic, O.R. 2012. Aplicación del método acelerado CAMBT para evaluar la reactividad alcalina de agregados. Ciencia y Tecnología de los Materiales, 6 p.
- Falcone, D., Milanesi, C.A., Violini, D. y Batic, O.R. 2011. Evaluación de la reactividad de los agregados - Método acelerado del prisma de hormigón - Parte II. VII Congreso Internacional sobre Patología y Rehabilitación de Estructuras, CINPAR, 11p.
- Falcone, D. y Milanesi, C. 2012a. Avances en la aplicación de un nuevo método acelerado para la evaluación de la reacción álcali-agregado Memorias, XIX Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, Buenos Aires: 207-214.

- Falcone, D. y Milanesi, C. 2012b. Método acelerado del prisma de hormigón. Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina. Memorias, XIX Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, Buenos Aires: 215-222.
- Fava, A.S.C., Manuele, R.J., Colina, J.F. y Cortelezzi, C.R. 1961. Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción álcali-agregado que se produce entre el cemento y los agregados, en el hormigón de cemento portland. LEMIT. Serie II, 85:313-349.
- Feret, R. 1937. Sur la forme et l'etat de durface des elementsinertes des betons. Annales de l'institut Technique, Paris, 2, 52p.
- Fili, M., da Rosa Filho, E.F., Auge, M., Montañó Xavier, J. y Tujchneider, O. 1998. El Acuífero Guaraní. Un recurso compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). Instituto Tecnológico Geominero de España. Boletín Geológico y Minero 109(4): 389-394.
- Fournier, B. y Bérubé, M.A. 2000. Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications. Canadian Journal of Civil Engineering, 27(2):167-191.
- Fournier, B. y Rogers, C.A. 2008: Multi-laboratory study of accelerated mortar bar test and concrete prism expansion tests at 38°C and 60°C. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Trondheim, Norway, 10p.
- França, A.B., Milani, E.J., Schneider, R.L, López Paulsen, O., López Puglissi, J.M., Suárez, R., de Santa Ana, H., Wiens, F., Ferreiro, O., Rossello, E.A., Bianucci, H.A., Flores, F.F.A., Vistalli, M.C., Fernández Seveso, F., Fuenzalida, R.P. y Muñoz, N. 1995. Phanerozoic correlation in Southern South America. En: A.J Tankard, R. Suarez y H.J. Welsink (eds.). Petroleum basins of South America. Amer. Assoc. Petrol. Geolog., 62: 129-161.
- Frenguelli, J. 1946. Las grandes unidades físicas del territorio argentino. Geografía de la República Argentina. Buenos Aires. GAEA 3, 1-114.
- Fulfaro, V.J., Saad, A.R., Santos, M.V. y Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Rev. Brasil. Geoc., 12 (4): 590-611.
- Gentili, C. y Rimoldi, H. 1979. Mesopotamia. En: Segundo Simposio Geología Regional Argentina. Córdoba. Academia Nacional de Ciencias, 1: 185-223.
- Giovambattista, A. 1977. El proyecto de Salto Grande. Estudios tecnológicos y criterios de diseño de sus hormigones. 3^a Reunión Técnica, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Entre Ríos, Argentina, 1:1.
- Giovambattista, A., Batic, O.R. y Traversa, L.P. 1981. Durabilidad de hormigones de cemento pórtland. Revista Hormigón. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina, 5:5-20.

- Giovambattista, A., Batic, O.R. y Traversa, L.P. 1985. Reacción álcali-sílice. Implicancias tecnológicas, ecológicas y económicas en la optimización de las soluciones ingenieriles. Memorias, Colloquia, AATH, Buenos Aires (Argentina), 85: 453-462.
- Giovambattista, A., Batic, O.R. y Traversa, L.P. 1986. Reactivity of alkalis and sandstone cemented with opal and chalcedony. Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ottawa, Canada: 408-412.
- Gonzaga de Campos, L. F. 1889. Secção geológica. São Paulo. Comissão Geográfica e Geológica. São Paulo, J. Skeller, Relatório: 21-24.
- Goso, H. 1965. El Cenozoico en el Uruguay: Montevideo. Instituto Geológico de Uruguay, Informe interno, 36p.
- Grattan-Bellew, P.E. 1989. Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate, 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Japan, 279p.
- Grattan-Bellew, P.E. 1996. Microstructural investigation of deteriorated portland cement concretes. Construction and Building Materials, 10(1):3-16.
- Groeber, P. 1938. Mineralogía y Geología. Espasa-Calpé Argentina, Buenos Aires: 1-492.
- Harrington, H.J. 1950. Geología del Paraguay oriental. Universidad de Buenos Aires, Fac. Cs. Exactas y Naturales, Contribuciones Científicas, Serie E, Geología, 1: 1-88.
- Guisseau, D., Mas, P.P., Beaufort, D., Girard, J.P., Inoue, A., Sanjuan, B., y Genter, A. 2007. Significance of the depth-related transition montmorillonite-beidellite in the Bouillante geothermal field (Guadeloupe, Lesser Antilles). American Mineralogist, 92(11-12):1800-1813.
- Herbst, R. 1969. Nota sobre la geología de Corrientes. IV Jornadas Geológicas Argentinas, Mendoza. Actas, 3: 87-95.
- Herbst, R., 1971. Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina. Asoc. Geológica Argent. Rev. Buenos Aires, 26 (2): 221-243.
- Herbst, R. 2000. La Formación Ituzaingó (Plioceno). Estratigrafía y distribución. El Neógeno de Argentina. INSUGEO Serie de Correlación Geológica, Tucumán, 14:181-190.
- Herbst, R. y Álvarez, B.B. 1974. Nota sobre dos formaciones del Cuaternario de Corrientes, República Argentina. Revista FaCENA (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura), 1: 7-17.
- Hergt, J.M., Peate, D.W. y Hawkesworth, C.J. 1991. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low - Ti flood basalts. Earth and Planetary Science Letters, 105: 134-148.
- Hobbs, D.W. y Gutteridge, W.A. 1979. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. Magazine of Concrete research, 31(109):235-242.

- Iacoviello, F., Giorgetti, G., Nieto, F. y Memmi, T. 2012. Evolution with depth from detrital to authigenic smectites in sediments from AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica). *Clay Minerals*, 47: 481–498.
- Ichikawa, T, y Miura, M. 2007. Modified model of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 37(9):1291-1297.
- Idorn, G.M. 1956. Disintegration of field concrete. Committee on alkali reactions in concrete. The Danish National Institute of Building and Research and the Academy of Technical Science, Copenhagen. Progress Report N°1, 39p.
- IRAM 1531. 2012. Agregado grueso para hormigón de cemento. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 28p.
- IRAM 1540. 1986. Agregados. Método de determinación del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm por lavado. . Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 7p.
- IRAM 1551. 2000. Hormigón de cemento portland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 12p.
- IRAM 1637. 1992. Reacción álcali-agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método de la barra de mortero. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 18p.
- IRAM 1647. 1994. Agregados para hormigón de cemento pórtland. Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 20p.
- IRAM 1649. 2008. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 18p.
- IRAM 1650. 1968. Reactividad alcalina en áridos. Método de ensayo químico. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 15p.
- IRAM 1674. 1997. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 14p.
- IRAM 1700. 1012. Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), 16p.
- Iriondo, M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral (Santa Fe)*, 11: 125 – 141.

- Iriondo, M.H., Krohling, D. y Orfeo, O. 1998. Tropical Realm (provinces of Corrientes and Misiones). En: Loess in Argentina: Temperate and tropical (Iriondo, M., Chairman), Paraná, Argentina, Excursion Guide, Nº 4, 27 p.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Janasi, V., Freitas, V. y Heaman, L. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 302:147-153.
- Janoušek, V., Farrow, C.M. y Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47: 1255-1259.
- Jensen, L.S. 1976. A new cation plot for classifying subalkaline volcanic rocks. *Ontario Geological Survey Miscellaneous*, 66, 21p.
- Jiménez, L.J. 2014. Reactividad álcali-agregado (RAA): experiencias en presas colombianas, análisis comparativo de principales variables que intervienen en el fenómeno. Magíster en Construcción, Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, 187p.
- Katayama, T., St. John, D.A. y Futagawa, T. 1989. The petrographic comparison of some volcanic rocks from Japan and New Zealand-potential reactivity related to interstitial glass and silica minerals. 8th Int. Cong. on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan: 537-541.
- Korkanç, M. y Tuğrul, A. 2005. Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, 35(3):505-512.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W y Tanesi, J. 2004. Diseño y control de mezclas de concreto. México D.F., Portland Cement Association - PCA, 459p.
- Kurihara, T. y Katawaki, K. 1989. Effects of moisture control and inhibition on alkali silica reaction. 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, 629-634.
- Kurtis, K.E., Collins, C.L., y Monteiro, P.J.M. 2002. The surface chemistry of the alkali-silica reaction: a critical evaluation and x-ray microscopy. *Concrete Science and Engineering*, 4(13):2-11.
- Lagorio, S.L. y Vizán, H. 2011. El volcanismo de Serra Geral en la Provincia de Misiones: aspectos geoquímicos e interpretación de su génesis en el contexto de la Gran Provincia Ígnea Paraná – Etendeka – Angola. Su relación con el volcanismo alcalino de Córdoba (Argentina). *Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Geoacta*, 36 (1): 27-53.

- Lambert, R. 1939. Memoria explicativa del mapa geológico de los terrenos sedimentarios y de las rocas efusivas del departamento do durazno. Boletín del Instituto Geológico del Uruguay, Montevideo, 25: 1-37.
- Larive, C., Laplaud, A. y Coussy, O. 2000. The role of water in alkali-silica reaction. 11th International Conference on Alkali Aggregate, Québec, Canada, 61-70.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.
- Leming, M.L. 1996. Alkali-silica reactivity: Mechanisms and management. *Mining Engineering*, 48(12):61-64.
- Lindgård, J., Nixon, P. J., Borchers, I., Schouenborg, B., Wigum, B. J., Haugen, M. y Åkesson, U. 2010. The EU "PARTNER" Project-European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations. *Cement and Concrete Research*, 40(4):611-635.
- Lindgård, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Rønning, T.F. y Thomas, M.D.A. 2012. Alkali - silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research*, 42(2): 223-243.
- López-Gamundí, O. y Rossello, E. 1993. Devoniane-Carboniferous unconformity in Argentina and its relation to Eo-hercynian orogeny in southern South America. *Geol. Rundsch*, 82: 136-147.
- López-Gamundí, O., Espejo, I., Conaghan, P. y Powell, C. 1994. Southern south america. En: Veevers, J.J., Powell, C.McA (eds.). *Permian-triassic Pangean Basins and Foldbelts along the Panthalassan Margin of Gondwanaland*, 184. Boulder, GSA, Memoir: 281-329.
- Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P.E., Xu, Z. y Tang, M. 2008. Development of a universal accelerated test for alkali-silica and alkali-carbonate reactivity of concrete aggregates. *Materials and Structures*, 41(2):235-246.
- Maiza, P., Marfil, S.A., Sota, J.D. y Batic, O.R. 1995. Estudio comparativo de rocas basálticas frente a la RAS. XII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Argentina: 127-140.
- Mantovani, M.S.M., Marques, I.S., De Sousa, M.A., Civetta, L., Atalla, L. y Innocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina state (southern Brazil). *Journal of Petrology*, 26:187-209.
- Mantovani, M.S.M., Stewart, K., Turner, S. y Hawkesworth, C.J. 1994. Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and source regions of continental flood basalts.

In International Symposium on the Physics and Chemistry of the Upper Mantle. Extend abstracts, São Pablo: 47-48.

Marfil S., Maiza P., Batic O. y Sota J. 1995. La sílice disuelta como parámetro para calificar agregados en forma preliminar frente a la reactividad alcalina potencial. XII Reunión de la AATH, La Plata: 173-178.

Marzoli, A., Melluso, L., Morra, V., Renne, P.R., Sgrosso, I., D'Antonio, M., Duarte Morais, L., Morais, E.A.A. y Ricci, G. 1999. Geochronology and petrology of Cretaceous basaltic magmatism in the Kwanza basin (western Angola), and relationships with the Paraná-Etendeka continental flood basalt province. *Journal of Geodynamics*, 28: 341-356.

McCoy, W.J. y Caldwell, A.G. 1951. A new approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. *Journal of the American Concrete Institute*, 47:693-706.

Medeiros, S., Ramos, V., Fernandes, I., Nunes, J.C., Fournier, B., Silva, A.S. y Soares, D. 2017. Volcanic aggregates from Azores and Madeira archipelagos (Portugal): an overview regarding the alkali silica reactions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95, 7p.

Menéndez, E. y Soriano, J. 2007. Procesos expansivos del hormigón: ensayos árido-álcali, ataque por sulfatos, hielo deshielo. Sistemas de prevención y actuaciones. Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Instituto Eduardo Torroja, CSIC, Madrid, 17p.

Meschede, M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207-218.

Meunier, A. 2003 Argiles. Société Géol. de France y GB. Science Pub., France, 433 p.

Milanesi, C. y Batic, O. 1994. Alkali reactivity of dolomitic rocks from Argentina. *Cement and concrete research*, 24(6):1073-1084.

Milanesi, C., Souza, C.E., Marfil, S. y Maiza, P. 2008. Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. XVII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, Argentina: 273-280.

Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 255p.

Milani, E. y Ramos, V. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Rev. Bras. Geociências*, 28 (4): 473-484.

Milani, E., Gonçalves de Melo, J., Alves de Souza, P., Fernandes, L. y França, A. 2007. Bacia do parana. *B. Geoci. Petrobras, Rio J.*, 15 (2): 265-287.

- Mincato, R.L. 2000. Metalogenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província ígnea continental do Paraná. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 172 p.
- Mira, A., Veroslavsky, G., Rossello, E., Vives, L., y Rodríguez, L. 2015. Subsurface geological modeling of Corrientes province (NE Argentina) and its relationships with the Guaraní Aquifer system function. *Journal of South American Earth Sciences*, 62: 148-163.
- Morrison, M.A. 1978. The use of "immobile" trace elements to distinguish the palaeotectonic affinities of metabasalts: applications to the Paleocene basalts of Mull and Skye, northwest Scotland. *Earth and Planetary Science Letters*, 39: 407-416.
- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Diederich, P., y Petit, L. 2010. Effects of aggregate size and álcali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 40(4): 508-516.
- NBR 15577-4. 2018. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, 11p.
- Noriega, J.I., Candela, A.M., y Vucetich, M.G. 2006. Nuevos registros de roedores Caviomorpha en la Formación Alvear (Plioceno, Entre Ríos). *Ameghiniana, resúmenes*, 43(4):48.
- Olafsson, H. 1986. The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars. 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, Canada: 461-465.
- Orfeo, O. 2005. Historia Geológica del Iberá, provincia de Corrientes, como escenario de biodiversidad. En: *Temas de la Biodiversidad del Litoral fluvial argentino II* (Aceñolaza, F.G., Coord, eds.). INSUGEO. Miscelánea, 14. 71-78.
- Orfeo, O., Georgieff, S., Anis, K. y Rizo, G. 2011. Depósitos sedimentarios modernos y antiguos del Río Paraná (Corrientes, Argentina): Un Análisis Comparativo, XXIII. Congreso Nacional del Agua Resistencia, Chaco, Argentina: 101-109.
- Padula, E. y Mingramm, A. 1968. Estratigrafía, distribución y cuadro geotectónico-sedimentario del "Triásico" en el subsuelo de la llanura Chaco-Paranense. *Terceras Jornadas Geol. Arg. Buenos Aires*, 1: 191-231.
- Page, C.L. y Page, M.M. 2007. *Durability of concrete and cement composites*. Washington: CRC Press. LLC, 416p.
- Pearce, J.A. y Cann, J.R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19: 290-300.

- Pearce, T.H., Gorman, B.E. y Birkett, T.C. 1977. The relationship between major element geochemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 121-132.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná–Etendeka Province. In: Mahoney, J.J. and Coffin, M.F. (eds.) *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, Geophysical Monograph 100: 217-245.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., Shukowsky, W. 1990. Mantle plumes and flood basalt stratigraphy in the Paraná, South America. *Geology*, 18:1223-1226.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119 - 139.
- Peate, D.W., Mantovani, M.S.M., Hawkesworth, C.J. 1988. Geochemical stratigraphy of the Parana continental flood basalts: borehole evidence. *Revista Brasileira de Geociências*, 18: 212-221.
- Pendneault, A. 1996. Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion and deterioration of concrete affected by ASR. M. Sc. Memor. Laval University, Quebec, Canada, 133 p.
- Perfit, M.R., Gust, D.A., Bence, A.E., Arculus, R.J. y Taylor, S.R. 1980. Chemical characteristics of island-arc basalts - Implications for mantle sources. *Chemical Geology*, 30(3): 227-256.
- Petrini, R., Civetta, L., Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S. y Melfi, A.J. 1987. Mantle heterogeneity and crustal contamination in the genesis of low - Ti continental flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): Sr-Nd isotope and geochemical evidence. *Journal of Petrology*, 28: 701-726.
- Pezzi, E. y Mozetic, M.E. 1989. Cuencas sedimentarias de la región chacoparanense. En: G.A. Chebli y L.A. Spalletti (eds.) *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica (Tucumán) Serie Correlación Geológica, 6: 65-77.
- Piccirillo, E.M. y Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo, 600 p.
- Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto M., Melfi, A.J., Pacca, I.G. y Ussami, N. 1988a. Significance of the Paraná flood volcanism in the disruption of western Gondwanaland. In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the*

- Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. Sao Pablo, Brasil: 285-295,
- Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P, Bellieni, G, Civetta, L, Marques, L.S., Melfi, A.J., Petrini, R. Raposo, M.I.B. y Stolfa, D. 1988b. Petrogenetic aspects of continental flood basalt-rhyolite suites from the Paraná basin (Brazil). In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. Sao Pablo, Brasil: 179-205.
- Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P, Melfi, A.J., Stolfa, D., Bellieni, G, Marques, L.S., Giaretta. A., Nardy, A.P.R., Pinese, J.P.P., Raposo, M.I.B. y Roisenberg, A. 1988c. Petrochemistry of continental flood basalt – rhyolite suites and related intrusives from the Paraná basin (Brazil). In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. São Pablo, Brasil: 107-156.
- Poole, A.B. 1992. Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion. 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, London (England), 104(1):782-789.
- Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Foray, G., Torrenti, J.M., Cognon, H. y Bourdarot, E. 2007. Chemical modeling of alkali silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution. *Materials and Structures*, 40(2): 229-239.
- Pedneault, A 1996. Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion and deterioration of concrete affected by ASR. Master thesis, Laval University, Québec, Canada, 133 pp.
- Powers, T.C. y Steinour, H.H. 1955a. An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction, Part 1: The chemical reactions and mechanism of expansion. In *Journal Proceedings*, 51(2):497-516.
- Powers, T.C. y Steinour, H.H. 1955b. An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction, Part 2-a hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete. In *Journal Proceedings*, 51(4):785-812.
- Priano, C., Marfil, S.A., Maiza, P. y Señas, L. 2012. Petrografía del hormigón de obras del sur de la Prov. de Buenos Aires. Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 20p.
- Putzer, H. 1962. Die Geologie von Paraguay: Gebriider Borntager, Berlin. Beitrage zur Regional en Geologie der Erde, 2:184.

- Ranc, R. y Debray, L. 1992. Reference test methods and a performance criterion for concrete structures. 19th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, 2: 824-831.
- Rasband, W.S. 2011. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>.
- Reig, O. 1956. Sobre la posición sistemática de "Zygolestes paranensis" Amegh. y de "Zygolestes entrerrianus". Amegh. Centro de Estudiantes del Doctorado en Ciencias Naturales de Buenos Aires. Revista Holmbergia, 5(12-13): 209-226.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M. y Perrin, M. 1992. The age of paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-cretaceous boundary. Science, 258: 975-979.
- Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G. y Piccirillo, E.M. 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. Earth Planet. Sci. Lett., 144:199-211.
- RILEM TC 106-AAR, 2000. Aggregate reaction. Materials and Structures, 33:283-293.
- RILEM, Recommended Test Method AAR-1. 2016. Detection of potential alkali reactivity of aggregates—petrographic method. Materials and Structures, 36:480-496.
- RILEM, Recommended Test Method AAR-2. 2016. Detection of potential alkali-reactivity of aggregates: A - The ultra-accelerated mortar-bar Test. Materials and Structures, 33(5):283-289.
- RILEM, Recommended Test Method AAR-3. 2000. Detection of potential alkali-reactivity of aggregates. Method for aggregate combinations using concrete prisms, 3(5):290-293.
- Rogers, C.A. y Hooton, R.D. 1989. Leaching of alkalies in alkali-aggregate reaction testing. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan: 327-332.
- Rogers, C.A., Grattan-Bellow, P.E., Hooton, R.D., Ryell, J. y Thomas, M.D.A. 2000. Alkali-aggregate reactions in Ontario. Canadian Journal of Civil Engineering, 27(2):246-260.
- Rollinson, H.R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK, 352 p.
- Rossello, E. A., Veroslavsky, G., De Santa Ana, H., Fúlfaro, V.J., y Garrasino, C.A.F. 2016. La dorsal Asunción - Río grande: un alto fondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). Revista Brasileira de Geociências, 36(3): 535-549.
- Russo, A., Ferello, R. y Chebli, G. 1979. Llanura Chaco Pampeana. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba), 1: 139-183.

- Sarkar, S.L., Dan, G.Z., Anal, K.M. y Lim, S.W. 2004. Handbook for identification of alkali-silica reactivity in airfield pavements. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, AC No 150/5380-8 Appendix 1, 79p.
- Scanferla, L.J. 2010. Evaluación de los Agregados Localmente Disponibles Para Ser Empleados en Hormigones de Pavimentos. LEMaC Centro de Investigación Vial. Tesis doctoral, Facultad Nacional La Plata. Universidad Tecnológica Nacional, 16p.
- Schenato, F., Formoso, M.L.L., Dudoignon, P., Meunier, A., Proust, D. y Mas, A. 2003. Alteration processes of a thick basaltic lava flow of the Paraná Basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(5): 423-444.
- Shayan, A. y Quick, G. W. 1988. An alkali-reactive basalt from Queensland, Australia. *International Journal of Cement Composites and lightweight Concrete*, 10(4):209-214.
- Shayan, A., Xu, A. y Morris, H. 2008. Comparative study of the concrete prism test (CPT 60°C, 100 % RH) and other accelerated tests. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Trondheim, Norway, 11p.
- Shervais, J.W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 101-118.
- Siivola, J. y Schmid, R. 2007. List of Mineral Abbreviations: Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Web version, 1(07).
- Smith, R.E y Smith, S.E. 1976. Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr K, P and Nb in classification of basaltic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 32: 114-120.
- Stanton, T.E. 1940a. Expansion of concrete reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66(10):1781-1811.
- Stanton, T.E. 1940b. Influence of cement and aggregate on concrete expansion. *Engineering News-Record*, 124(5):59-61.
- Stanton, T.E., Porter, O.J., Meder, L.C. y Nicol, A. 1942. California experience with the expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Journal of the American Concrete Institute*, 38:209-236.
- Stark, D.C. 1991. The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity. CANMET/ACI. 2nd International Conference on Durability of Concrete, SP-126, American Concrete Institute: 973-987.
- Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P. y Diamond, S. 1993. Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity. SHRPC- 343, National Research Council, Washington D.C., 273p.

- St John, D.A., Poole, A.B. y Sims, I. 1998. Concrete petrography: a handbook of investigative techniques. John Wiley & Sons Inc. eds., 474p.
- Stewart, K.S., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C.J., Kirstein, L. y Mantovani, M.S. 1996. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná flood Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143: 95-110.
- Sumner, P.D., Hall, K.J., Van Rooy, J.L. y Meiklejohn, K.I. 2009. Rock weathering on the eastern mountains of southern Africa: Review and insights from case studies. *Journal of African Earth Sciences*, 55(5):236-244.
- Sun, S.S. y McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En: *Magmatism in the Ocean Basins*. Saunders, A.D. and M.J. Norry (eds). Special Publication Geological Society of London, 42: 313-345.
- Swamy, R.N. 1992. The alkali-silica reaction in concrete. Glasgow: Blackie, New York: Van Nostrand Reinhold, 336p.
- Swenson, E.G. 1957a. Cement-aggregate reaction in concrete of a Canadian bridge. *ASTM Proceedings*, 57:1043-1056.
- Swenson, E.G. 1957b. A reactive aggregate undetected by ASTM test. *ASTM Bulletin*, 226:48-51.
- Tchilinguirían, P., Cavallaro, S., Ducos, E., Fratalocchi, C., Marengo, H., Palma, Y. L., Tejedo, A., Tobio, M., Toloczycki, M. y Portaneri, J. 2005. Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial, San Ignacio, provincia de Misiones. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Buenos Aires: 43-97.
- Thomas, M. 2011. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, 41(12):1224-1231.
- Thomas, M.D.A., Fournier, B. y Folliard, K.J. 2008. Report on determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction. FHWA-HIF-09-001. Report, 28p.
- Tiecher, F., Dal Molin, D.C.C., Gomes, M E.B., Hasparyk, N.P. y Monteiro, P.J.M. 2012. Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*, 34(10):1130-1140.
- Tófalo, O. y Pazos, P. 2010. Paleoclimatic implications (Late Cretaceous-Paleogene) from micromorphology of calcretes, palustrine limestones and silcretes, southern Paraná Basin, Uruguay. *J. South Am. Earth Sci.*, 29 (3): 665-675.

- Torra, R. 2001. Sedimentología de las arenas de la Formación Ituzaingó entre Itatí y Empedrado, Provincia de Corrientes con algunas observaciones adicionales en áreas adyacentes. Tesis Doctoral. Instituto de Estratigrafía y Geología Sedimentaria Global (IESGLO). Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán, 421p.
- Touma, W.E. 2000. Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives. Faculty of the Graduate School. University of Texas at Austin, 520p.
- Turner, S.P, Hawkesworth, C.J, Gallagher, K., Stewart, K., Peate, D.W. and Mantovani, M.S.M. 1996. Mantle plumes, flood basalts and thermal models for melt generation beneath continents: assessment of a conductive heating model and application on the Paraná. *Journal of Geophysical Research*, 101: 11503-11518.
- Turner, S.P., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C.J. y Mantovani, M.S.M. 1994. Magmatism and continental break-up in South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 333-348.
- Urien, C.M. 2003. Present and future petroleum provinces of Southern South America. En: M.W. Downey, J.C. Theet y W.A. Morgan (eds.). *Petroleum provinces of the twenty-first century*. Amer. Assoc. Petrol. Geolog. Memoir, 74: 373-402.
- Velde, B. 1992. Introduction to clay minerals. Chemistry, origin, uses and environmental significance. Chapman and Hall, London, 198p.
- Veronelli, D.J. 1975. Durabilidad del hormigón. Reacción álcali-agregado. Instituto del cemento portland Argentino. Serie R, Tecnología de los Materiales, 64, 51p.
- Veronelli, D.J. 1978. Durabilidad de los hormigones. Reacción árido-álcalis. *Materiales de Construcción*, 28(171):5-33.
- Vivian, H.E. 1950. The effect on mortar expansion of amount of reactivity component in the aggregate. *Bulletin-Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia*, 256:13-20.
- Wainsztein, M., Barranquero, H. y Muñoz, L. 1989. Investigación y caracterización de los áridos empleados en las estructuras de hormigón de Yacyretá. 9ª Reunión Técnica, AATH, Buenos Aires, 1:287-300.
- Wakizaka, Y. 2000. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. *Engineering Geology*, 56(1-2):211-221.

- Walker, H.N., Stephen, L.D. y Stutzman, P.E. 2006. Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 353p.
- West, 1996. A mechanisms for alkali-silica reaction in concrete roads. Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M. (Eds.). Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japón: 95-100.
- White, I.C. 1908. Relatório sobre as "Coal measures" e rochas associadas do Sul do Brasil. Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro, 300p.
- Wigum, B.J. 1995. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology*, 40(3-4):195-214.
- Wigum, B.J., Pedersen, L.T., Grell, B. y Lindgård, J. 2006. State-of-the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction. SINTEF Report, SBF52 A06018, 131p.
- Wildner, W., Hartmann, L. y Lopes, R. 2007. Serra Geral magmatism in the Paraná Basin, a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. En: Gramado. Problems in the Western Gondwana Geology, I Workshop - South America – Africa, 1: 189-197.
- Wood, D.A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crust contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50: 11-30.
- Yrigoyen, M. R. 1975. Geología del subsuelo y plataforma continental. En: Relatorio 6^º Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca: 139-168.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C., Appi, V.T., Neto, E.V., Cerqueira, J. y Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. En: M.W Leighton, D.R Kolata, D.F. Oltz y J.J. Eidel (eds.). Interior cratonic basins. *Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 51: 681-708.
- Zollinger, D.G., Mukhopadhyay, A.K., Ghanem, H., Shon, C.S., Gress, D., y Hooton, D. 2009. Mitigation of ASR in concrete pavement - combined materials testing. Report IPRF-01-G- 002-03-2.