



# Geología, petrografía y caracterización técnica de las areniscas de la Formación Los Ranqueles, sur de la provincia de Córdoba: su aplicación como agregado en la construcción

**Ignacio H. BIN<sup>1,2</sup>, Manuel DEMARTIS<sup>1</sup>, M. Fernanda POKLEPOVIC<sup>3</sup> y Jorge E. CONIGLIO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias de la Tierra, Biodiversidad y Ambiente (ICBIA) (UNRC-CONICET), Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto.

<sup>2</sup>Incisa S.A. – Laboratorio de calidad.

<sup>3</sup>Dirección Provincial de Vialidad, provincia de Córdoba, Departamento I, Tecnología y Laboratorio.

Email: ignaciohugobin@gmail.com, mdemartis@exa.unrc.edu.ar, fpoklepovic@gmail.com, jconiglio@exa.unrc.edu.ar

**Editor:** Diego A. Kietzmann

Recibido: 21 de septiembre de 2021

Aceptado: 16 de marzo de 2022

## RESUMEN

Se expone una caracterización geológica, petrográfica y técnica de las sedimentitas de la Formación Los Ranqueles, ubicadas en Sampacho, sur de la provincia de Córdoba. Esta formación está conformada por sublitoarenitas medias a gruesas, con intercalaciones de conglomerados finos y areniscas finas. Se evaluaron las características petrográficas y físico-mecánicas de dos tipos litológicos principales: areniscas grises y moradas. Se realizaron ensayos físicos normalizados (coeficiente Los Ángeles, peso específico, absorción, laxidad, elongación), petrografía (textura y moda mineral) y estudio de comportamiento frente a la reacción álcali-sílice (RAS). Ambos tipos litológicos presentan alta absorción (> 2.0 %), bajo peso específico aparente (< 2.58) y coeficiente Los Ángeles de 30 a 42 %. Se definieron los usos óptimos de cada litología según la normativa de requisitos vigente y pliegos de especificaciones. La resistencia de las areniscas está principalmente controlada por el grado de cementación, la porosidad y la mineralogía del cemento. Las que tienen empaquetamiento más cerrado, mayor grado de cementación con minerales más resistentes y menor porosidad, presentan menor coeficiente Los Ángeles y absorción. Las rocas estudiadas podrían ser consideradas en nuevos proyectos de obras civiles para sub-bases y bases granulares, calzadas de hormigón de bajo tránsito, hormigones no sujetos a abrasión, sub-balasto y estructuras de contención hidráulica. Este trabajo representa un aporte al conocimiento de esta formación y reafirma la importancia de los estudios geológicos y petrográficos en la explotación de agregados para la construcción.

**Palabras clave:** sedimentitas, Sampacho, resistencia mecánica, estructura de pavimentos, hormigones.

## ABSTRACT

*Geological, petrographic and technical characterization of the Los Ranqueles Formation's sandstones, south of Córdoba province, Argentina: its application as aggregate in construction.*

A geological, petrographic and technical characterization of the sedimentary rocks of the Los Ranqueles formation, located in Sampacho, southern Córdoba province, is exposed. This formation is constituted by medium- to coarse-grained sublitharenite, with intercalations of fine-grained conglomerates and fine-grained sandstone. Petrographic and physico-mechanical features were evaluated in two main lithological types: grey sandstone and purple sandstone. Standardized physical tests (Los Angeles coefficient, specific weight, absorption, laxity, elongation), petrography (texture and mineral mode) and evaluation of deleterious expansion of concrete due to alkali-silica reaction (ASR) were carried out. This sandstones present high absorption (> 2.0%), low specific density (< 2.58) and Los Angeles coefficient from 30 to 42 %. The optimal uses for each lithology were defined according to the current regulations. The strength of the sandstones is mainly controlled by the porosity, the degree of cementation and the mineralogy of the cement. Lower Los Angeles coefficients and absorption values were obtained in those rocks that have closer packing, greater contact between

grains, greater degree of cementation with more resistant minerals and lower porosity. The studied rocks could be considered in new projects of civil works for sub-bases and granular bases, low-traffic pavements, concretes not subject to abrasion, sub-ballast and hydraulic containment structures. This work represents a contribution to the knowledge of this formation and reinforces the importance of geological and petrographic studies in the exploitation of aggregates for construction.

**Key words:** sedimentary rocks, Sampacho, mechanical resistance, pavement structure, concrete.

## INTRODUCCIÓN

La provincia de Córdoba presenta una amplia variedad de rocas de distinta naturaleza que le ha permitido ser reconocida históricamente por la gran disponibilidad de sus agregados pétreos para la industria de la construcción. Esta actividad se caracteriza en los últimos años por una permanente fluctuación entre periodos de gran desarrollo y otros de recesión (Ministerio de Hacienda y finanzas públicas 2016). Esto, sumado a la escasa o nula inversión en prospección y exploración de nuevos recursos y en la optimización de procesos productivos de materias primas, ha conllevado a una alternancia entre momentos de sobredemanda y épocas con capacidad productiva ociosa en las canteras actualmente en explotación. Esta inestabilidad del mercado ha derivado en un detrimento de la calidad de los agregados disponibles o, contrariamente, en la utilización de materiales de altas resistencias físico-mecánicas en estructuras menos exigentes donde es posible emplear materiales de menores prestaciones sin afectar el desempeño de dicha estructura (Frías et al. 2001, Poklepovic et al. 2009, Silva Brunelli et al. 2009, Bonalumi et al. 2009, Locati et al. 2010, Bin et al. 2017, 2018, 2021, Bin 2021). Por lo mencionado, se hace indispensable prospectar y explorar nuevas fuentes de provisión de materiales y demarcar el uso-aptitud óptimo de cada variedad litológica y/o yacimiento y así poder aportar la información necesaria para conducir a la industria minera de áridos hacia una explotación racional, sustentable y sostenible de los recursos pétreos.

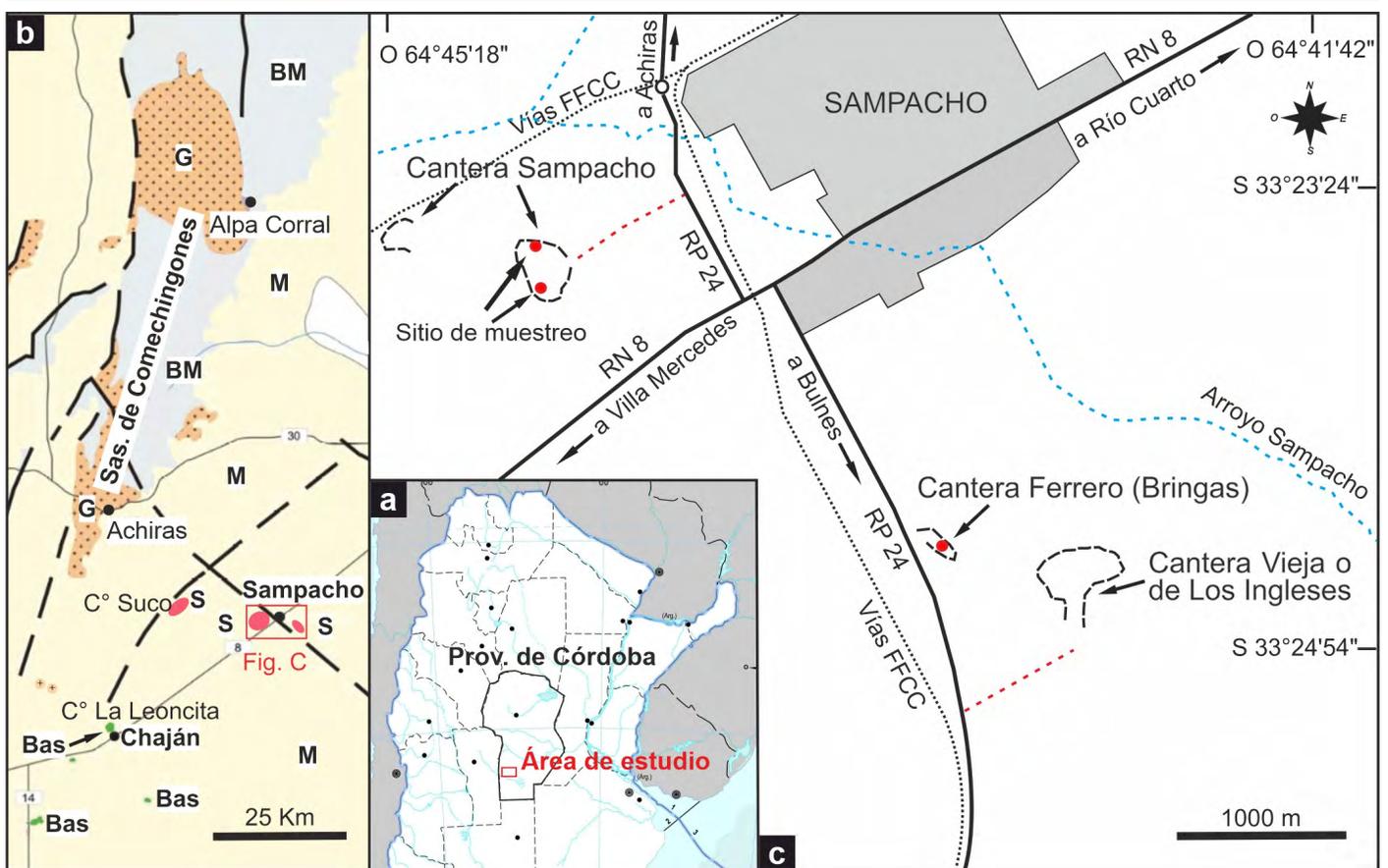
En el sur de la provincia de Córdoba, en los alrededores de la localidad de Sampacho, afloran sedimentitas de alta tenacidad, incluidas dentro de la Formación Los Ranqueles (Fig. 1a). Éstas constituyen pequeñas elevaciones aisladas, ubicadas en el área extraserrana contigua al sur de la Sierra de Comechingones (extremo sur de las Sierras Pampeanas Orientales) (Fig. 1b), que apenas sobresalen de la llanura circundante, a excepción del cerro Suco que presenta mayor desnivel topográfico. Fueron explotadas como rocas de aplicación en diferentes épocas y para usos diversos, hallándose tres canteras principales: Sampacho, Ferrero y Cantera Vieja o de Los Ingleses (Fig. 1c). Debido a que los yacimientos se

encuentran en sitios de fácil accesibilidad y cercanos a vías principales de carácter provincial y nacional, presentan una ubicación estratégica, por lo que resulta de gran interés la caracterización técnica de esta formación. Numerosos autores (Bodenbender 1905, 1929, Pastore 1938, Pandolfi 1938, Sosic 1964, Gordillo y Lencinas 1979, Hünicken y Pensa 1980, Hünicken et al. 1981, Azcuy et al. 1987, Azcuy et al. 1999, Gutiérrez 2008, Astini y Del Papa 2014) las han mencionado o descrito a nivel de unidad litoestratigráfica.

La presente contribución, junto con los trabajos de Bin et al. (2017) y Bin (2021), representa uno de los primeros antecedentes donde se realiza una descripción petrográfica y evaluación técnica, con el objetivo de aportar al conocimiento geológico de esta formación, determinar su uso óptimo como roca de aplicación y evaluar la influencia de sus características intrínsecas en el comportamiento físico-mecánico. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación de mayor magnitud que tiene como objetivo la búsqueda y evaluación de rocas ubicadas en el centro-sur de la provincia de Córdoba, que constituyan potenciales fuentes de provisión de agregados pétreos y áridos para diversos usos, vinculados principalmente a la ejecución de obras viales: elaboración de mezclas asfálticas, hormigones y capas granulares.

## FORMACIÓN LOS RANQUELES: GEOLOGÍA Y ANTECEDENTES MINEROS

La Formación Los Ranqueles constituye una secuencia sedimentaria conformada esencialmente por areniscas subblásticas gruesas a medias, con algunas intercalaciones de conglomerados finos (Fig. 2a). Fueron mapeadas a principios del siglo XX por Bodenbender (1905, 1929) y Pastore (1938), caracterizadas y definidas como Areniscas de Sampacho o Areniscas cuarcíticas de Sampacho por Pandolfi (1938), Sosic (1964) y Gordillo y Lencinas (1979). Hünicken y Pensa (1980), Hünicken et al. (1981) y Azcuy et al. (1987) proponen el término Formación Los Ranqueles para reemplazar el anterior y la dividen en dos miembros, uno inferior denominado Miembro Sampacho y otro superior designado como Miembro



**Figura 1.** a) Mapa de ubicación. Se indica con un recuadro la zona de estudio de la figura 1c; b) Mapa geológico simplificado de la porción sur de las Sierras de Comechingones y la zona extra serrana. G: Granitoides; BM: Basamento Metamórfico; S: Sedimentitas Fm. Los Ranqueles; Bas: Basaltos; M: Relleno Sedimentario Moderno. El recuadro indica el sector abarcado en la figura 1c (modificado de Gentile 2008); c) Ubicación y vías de acceso a las canteras existentes en las areniscas de la formación Los Ranqueles. Se señala con puntos rojos el sitio de extracción de muestras para los ensayos de laboratorio y descripciones petrográficas.

Suco (Fig. 2a). La principal diferencia entre ellos radica en que el Miembro Sampacho está formado por areniscas con frecuentes intercalaciones de conglomerados, mientras que el miembro Suco posee amplia predominancia de areniscas sobre otras litologías. Entre los antecedentes se destacan también la completa recopilación bibliográfica realizada por Azcuy et al. (1999) y Gutiérrez (2008), el reconocimiento en subsuelo de esta unidad (Chebli et al. 1999, 2005, Webster et al. 2004, Calegari et al. 2014) y el aporte más reciente de Astini y Del Papa (2014), que contribuye a la correlación regional.

Forma parte de la cobertura sedimentaria del Paleozoico superior de la región Pampeana (Astini y Del Papa 2014). Desde un punto de vista regional ha sido cartografiadas con el mismo nombre dentro de la sierra de la Estanzuela, en San Luis (Hünicken et al. 1981). La determinación de la posición estratigráfica de la Formación Los Ranqueles se ha visto siempre dificultada por la ausencia de fósiles. Diversos autores la han referido con dudas al Carbonífero superior – Pérmico por su similitud con otras secuencias conocidas y la han correlacionado con la Formación Bajo de Véliz (Olsacher 1935, Pas-

to 1938, Susic 1964, Gordillo y Lencinas 1979, Fernández Seveso et al. 1988). Hünicken et al. (1981) la correlacionan con el miembro Cadillo de la Formación Chancaní (Fig. 2b).

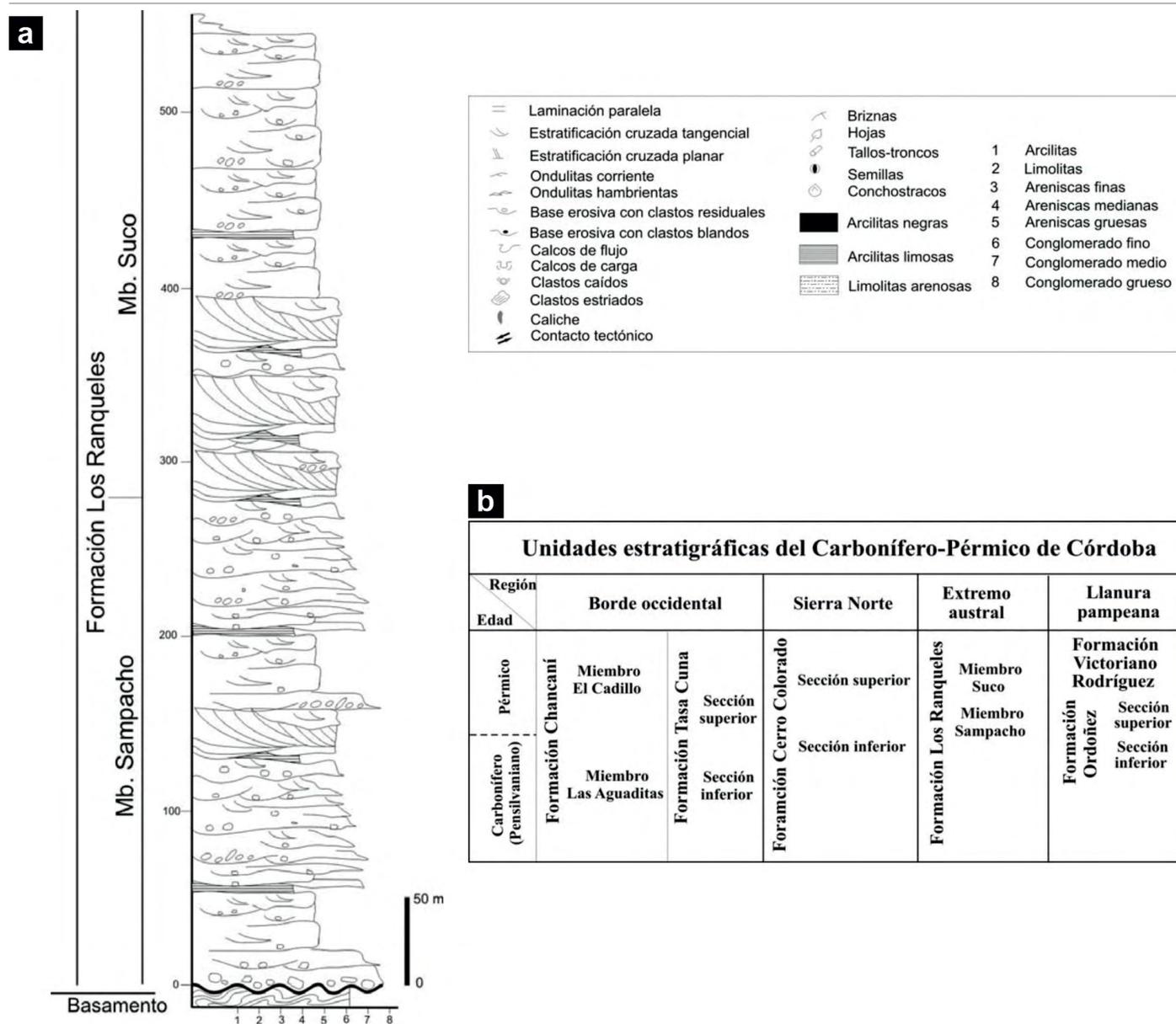
La base de la formación se puede observar en el cerro Suco y en el cerro La Leoncita (Chaján) (Fig. 1b), donde apoya en discordancia sobre el basamento ígneo-metamórfico, mientras que el techo, en algunos sectores, está truncado por una falla y, en otros, constituye una superficie erosiva (Astini y Del Papa 2014). Hünicken et al. (1981) sugieren un espesor máximo de 360 m para la unidad, no obstante, en forma directa, los afloramientos de mayor espesor son los del cerro Suco donde alcanzan algo menos de 100 metros. La sucesión se presenta en bancos tabulares y lenticulares bien definidos, de espesores que varían entre 0.5 y 2 m, con frecuente estratificación entrecruzada planar y, ocasionalmente, lenticular. Los estratos son subhorizontales con una orientación N-S a NE cuya suave inclinación varía de E a O. También, se han observado bancos subverticales en el cerro Suco (Susic 1964). Algunos autores proponen que las sedimentitas aumentan su espesor hacia el SE por debajo de la cobertura sedimentaria moderna, por lo

que se proyectarían en el subsuelo de la cuenca de General Levalle (Chebli et al. 2005, Calegari et al. 2014). En relación a su dinámica de depositación, algunos autores sugieren que esta unidad se habría depositado en un ambiente fluvial, con posible participación de episodios eólicos en el miembro superior (Azcuy et al. 1987, Astini y Del Papa 2014).

Los primeros antecedentes mineros datan de principios del siglo XX en la cantera Vieja o de Los Ingleses (Fig. 1c), donde las areniscas fueron explotadas por capitales ingleses y utilizadas como balasto para la construcción de las vías férreas que atraviesan la zona, contando incluso con un desvío propio del ramal para el despacho de la producción. La cantera Sampacho fue explotada aproximadamente entre los años

1930 y 1970 en intervalos intermitentes y, según fuentes informales, el material era principalmente transportado por el ferrocarril hacia el puerto de Buenos Aires, donde se desconoce su aplicación. Localmente, era utilizado para la construcción de cordón cuneta, adoquines y como "piedra de afilar". La explotación más reciente fue llevada a cabo en la cantera Ferrero por la empresa Canteras Bringas entre los años 2005 y 2010 aproximadamente, cuya producción fue utilizada para la ejecución de gaviones en una obra de protección hidráulica cercana. En la actualidad, en esta cantera sólo se realizan extracciones ocasionales de piedra de primera voladura para los mismos fines.

Como antecedentes de estudios técnicos de la Formación



**Figura 2.** a) Columna tipo de la Formación Los Ranqueles (Carbonífero-Pérmico), con la división de los miembros formales; b) Nomenclatura de las unidades del Carbonífero-Pérmico de la provincia de Córdoba, donde se correlaciona temporalmente a la formación Los Ranqueles con otras sedimentitas paleozoicas. Ambas figuras tomadas de Astini y Del Papa (2014).

Los Ranqueles sólo se pueden mencionar algunos ensayos realizados en la cantera Ferrero a modo de relevamiento preliminar por personal de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba (DPV-Cba), en el marco del Convenio Secretaria de Minería-Dirección Provincial de Vialidad alrededor del año 2005 (datos inéditos), el estudio geológico-económico realizado por Macías (1981) y las caracterizaciones petrográficas y técnicas de Bin et al. (2017) y Bin (2021).

## METODOLOGÍA

Los estudios se focalizaron en las canteras Sampacho y Ferrero (Fig. 1c), donde se llevaron a cabo las descripciones de los perfiles y las distintas litologías identificadas teniendo en cuenta las yacencias, morfologías, estructuras sedimentarias, texturas y mineralogía. Luego, sobre la base de estos criterios, se seleccionaron los sitios representativos y se tomaron cinco muestras para los ensayos de caracterización petrográfica y técnica. En cada sitio de muestreo se recolectaron aproximadamente 80 kg de roca con el fin de realizar ensayos técnicos para su aplicación en la industria vial, siguiendo los lineamientos y criterios establecidos en la norma IRAM 1509 (1987). En laboratorio, se redujo de forma manual el tamaño de los bloques de las muestras tomadas en el campo, hasta alcanzar aproximadamente los 10 cm de diámetro. Luego, se procesó el material en una trituradora de mandíbulas perteneciente al laboratorio de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba con cámara de trituración de 200 x 100 milímetros. Posteriormente, se realizó el tamizado y la separación de las fracciones granulométricas correspondientes para realizar los ensayos de calificación y aptitud de cada muestra como agregado en hormigones, mezclas asfálticas y capas granulares. Los ensayos físicos normalizados se ejecutaron en los laboratorios centrales de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba y se efectuaron siguiendo los procedimientos descritos en las Normas IRAM y en las Normas de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) correspondientes. Los cortes delgados y los estudios petrográficos con microscopio óptico de luz transmitida se llevaron a cabo en el Departamento de Geología de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Se incluyeron ensayos rutinarios para evaluar las propiedades mineralógicas, texturales, químicas y físico-mecánicas. Se realizó el examen petrográfico normalizado (según normas IRAM 1649-2008, 1702-1981 y 1703-1981, y normas de la Dirección Nacional de Vialidad VN - E66 - 82-1998 y VN - E67 - 75-1998). Además, se ejecutó el conteo modal con contador de puntos (más de 400 puntos por muestra) donde se cuantificó, por un lado, la naturaleza de los clastos (cuar-

zo monomineral, líticos - incluido chert y cuarzo policristalino - y feldespatos) para poder clasificar la roca y, por otro, la mineralogía total sin distinguir si el mineral se hallaba como parte de un clasto o como cemento. Esto último se realizó para poder evaluar la potencialidad de reacción álcali-sílice de la roca según la norma IRAM 1531 (2016). El límite entre cuarzo cristalino y microcristalino se ubicó 0.062 mm de tamaño de grano, según lo establecido en dicha norma. Con esta misma metodología, se determinó el porcentaje de poros en la sección delgada, el cual se consideró equivalente a la porosidad actual de la roca. Las areniscas se describieron y clasificaron según Folk et al. (1970) y Folk (1974). Con la fracción retenida por el tamiz IRAM  $\frac{3}{4}$ " de abertura, se realizaron los ensayos de Peso Específico Aparente (PEA) y absorción de agua, según la norma de Vialidad Nacional VN-E13-67 (1998). Con material de la misma muestra original, se realizaron ensayos de determinación de la resistencia a la fragmentación por el método "Los Ángeles" según Norma IRAM 1532 (2009) (donde se obtiene el coeficiente Los Ángeles - CLA), y se determinaron la lajosidad y elongación de cada una de las fracciones que se introdujeron en la máquina "Los Ángeles", con los calibres especificados en las normas VN-E38-86 (1998) e IRAM 1687-1 (1996), 1687-2 (1997). Los índices de lajosidad y elongación presentados se obtuvieron a partir de al menos 200 partículas de cada una de las fracciones. Para evaluar la influencia de la forma de los agregados en la resistencia físico-mecánica, se realizaron ensayos de coeficiente Los Ángeles con muestras obtenidas directamente de la trituración, cuya forma de los agregados no es controlada, y otros con partículas seleccionadas de baja lajosidad y elongación.

A partir del examen petrográfico según la Norma IRAM 1531 (2016), se determinó que las arenitas son potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice (RAS). Debido a que es el tipo litológico dominante en la Formación Los Ranqueles, se evaluó mediante ensayos de laboratorio la reactividad solamente de la denominada 'arenisca gris', cuya descripción se encuentra más adelante. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-La Plata), siguiendo estrictamente los procedimientos establecidos en las Normas IRAM 1674 (1997) y 1700 (2013) (a 38 y 60 °C).

Para la determinación del cambio de longitud debido a la reacción álcali-sílice en prismas de hormigón (Norma IRAM 1700-2013), se preparó un pastón de 12 litros con los siguientes componentes:

- Agregado Gueso (60 %): Constituido por las areniscas grises de la cantera Sampacho en la fracción Pasante tamiz  $\frac{3}{4}$ -Retenido tamiz N°4. Muestra previamente lavada y secada.
- Agregado fino (40 %): Constituido por arena oriental del

rio Uruguay, comprobadamente no reactiva.

- Cemento (CPN-40 marca Avellaneda): Cemento de características químicas conocidas. Fue necesaria la adición de 29.4 g de Hidróxido de sodio (en escamas) para alcanzar los 5.5 kg de álcalis por m<sup>3</sup> de hormigón, que exige la norma correspondiente.

- Agua: de red, apta para hormigones.

El dosaje de hormigón utilizado se diseñó de acuerdo al método del Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) para un hormigón convencional. Con estos materiales se procedió a la elaboración de seis prismas de hormigón de sección transversal cuadrada de  $75 \pm 1$  mm y un largo comprendido entre 275 y 405 mm, los cuales llevan insertos los pernos de medición de acero inoxidable de  $6 \pm 1$  mm de diámetro y 25 mm de largo. Transcurridas 24 horas se desmoldan y a las 48 horas se realiza la lectura inicial de longitud. Luego, los prismas se envuelven con telas húmedas, se insertan en bolsas de polietileno y se colocan en recipientes plásticos con agua, de manera de asegurar una atmósfera húmeda. Posteriormente, tres prismas se someten a  $38 \pm 2$  °C de temperatura durante 52 semanas (1 año) ininterrumpidas (método tradicional) y los demás a 60 °C durante 20 semanas (método acelerado). De acuerdo al método, se toman lecturas de longitud de los prismas en diferentes semanas de su confección: los ensayados según el método tradicional se miden a las 1, 2, 4, 8, 13, 18, 39 y 52 semanas, mientras que los ensayados con el método acelerado se miden a las 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. La diferencia entre las lecturas a 52 semanas (método tradicional) y 13 semanas (método acelerado) con la lectura inicial, expresada en porcentaje de expansión respec-

to a la longitud del prisma, indica la expansión generada por reacción álcali-sílice.

Para la determinación de la reactividad alcalina potencial por el método acelerado de la barra del mortero (Norma IRAM 1674-1997) se utilizó la siguiente dosificación:

- Agregado (arenisca gris de cantera Sampacho): 900 g (en las fracciones correspondientes según la norma)

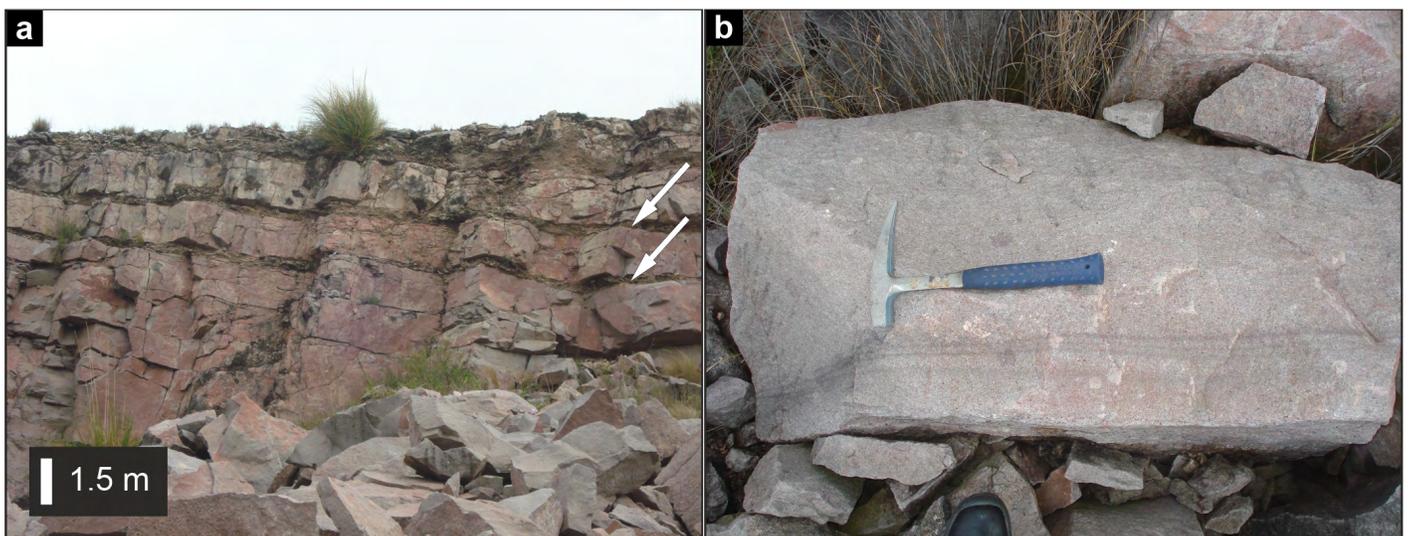
- Cemento (CPN-40): 400 g (de características químicas conocidas)

- Agua (de red): 188 g

Con estos materiales, se procedió a la confección de tres barras de mortero con sus respectivos pernos de medición similares a los de los prismas. Estas barras, al día siguiente de su elaboración, se sumergen 24 horas en agua destilada a  $80 \pm 2$  °C y después durante 14 días en una solución de hidróxido de sodio según lo establecido por la norma (40 gr de sodio por litro de agua) a la misma temperatura. En los días 3, 7, 9, 13, 15 y 16 después de su confección, se toman mediciones de su longitud con una precisión de 0.001 mm, siendo el día 3 la lectura inicial y el día 16 la lectura final. La diferencia de longitud entre dichas mediciones, expresada en porcentaje de expansión respecto al largo de la barra, determina el valor de expansión.

## GEOLOGÍA DE LAS CANTERAS FERRERO Y SAMPACHO

En el frente de mayor envergadura de la cantera Sampacho, donde se ejecutó en los últimos años una voladura de



**Figura 3.** Arenisca gris de la Formación Los Ranqueles en la cantera Sampacho. a) Frente principal. Se identifican la estructura tabular planar subhorizontal, los colores rosados por pátinas de óxidos de Fe y el material fino entre los estratos superiores (señalados con flechas); b) Aspecto habitual de la arenisca gris a escala mesoscópica. Se puede observar la laminación marcada solamente por una diferencia en la tonalidad del cuarzo (altura de piqueta 32.5 cm).



**Figura 4.** a) Fotografía de un frente de explotación de la cantera Ferrero. Se remarca la estructura; b) Esquematación de la disposición de los estratos. Se observan bancos con estructura tabular planar a la derecha y en artesa a la izquierda. El cuadrado indica el sector donde se tomó la foto de la figura 5a.

exploración, se observan areniscas grises sublíticas gruesas a medias, dispuestas en bancos tabulares subhorizontales bien definidos, de 0.5 a 3.0 m de potencia, con orientación N-S a NE e inclinaciones  $< 20^\circ$  hacia el O-NO, con estratificación planar (Fig. 3a). Internamente en los bancos, la roca presenta una estructura maciza, aunque ocasionalmente muestra una laminación horizontal marcada solamente por una diferencia en la tonalidad del cuarzo (Fig. 3b). En los 5 metros superiores del perfil, entre los bancos de areniscas, se observan estratos de poco espesor (menores a 0.20 m) compuestos por bloques de areniscas fracturados rodeados de material fino, donde se identificó la presencia de carbonatos como cemento (Fig. 3a).

La cantera Ferrero posee frentes expuestos de hasta ocho metros de roca no alterada. En este sitio, se observaron bancos de espesores de 0.20 a 2.5 m, algunos de los cuales

varían notablemente su espesor lateralmente conformando lentes (Fig. 4a y b). Los estratos no son compactos, sino que poseen numerosas fracturas perpendiculares a los planos de estratificación. Están compuestos por areniscas finas a muy gruesas e, incluso, conglomerádicas, de color blanco a castaño, localmente amarillentos o rojizos, algunos de las cuales presentan gradación normal interna en las capas. Se observó una estructura tabular planar cortada por artesas con areniscas conglomerádicas en la base que gradan a areniscas finas en su porción superior (Fig. 5a). Entre los bancos superiores, se observaron estratos compuestos de bloques de areniscas rodeado de material fino y cemento carbonático, similares a los observados en la cantera Sampacho. En la cantera Ferrero se manifiesta una fracturación frágil moderna, donde resaltan fisuras de rumbo  $270-290^\circ$  e inclinaciones mayores a  $50^\circ$  al norte, que generan un brechamiento de las areniscas y una

zona de falla que puede alcanzar los 0.6 m de espesor, con numerosas vetillas de óxido de hierro. Estas fallas generan localmente alta friabilidad de la roca (Fig. 5b).

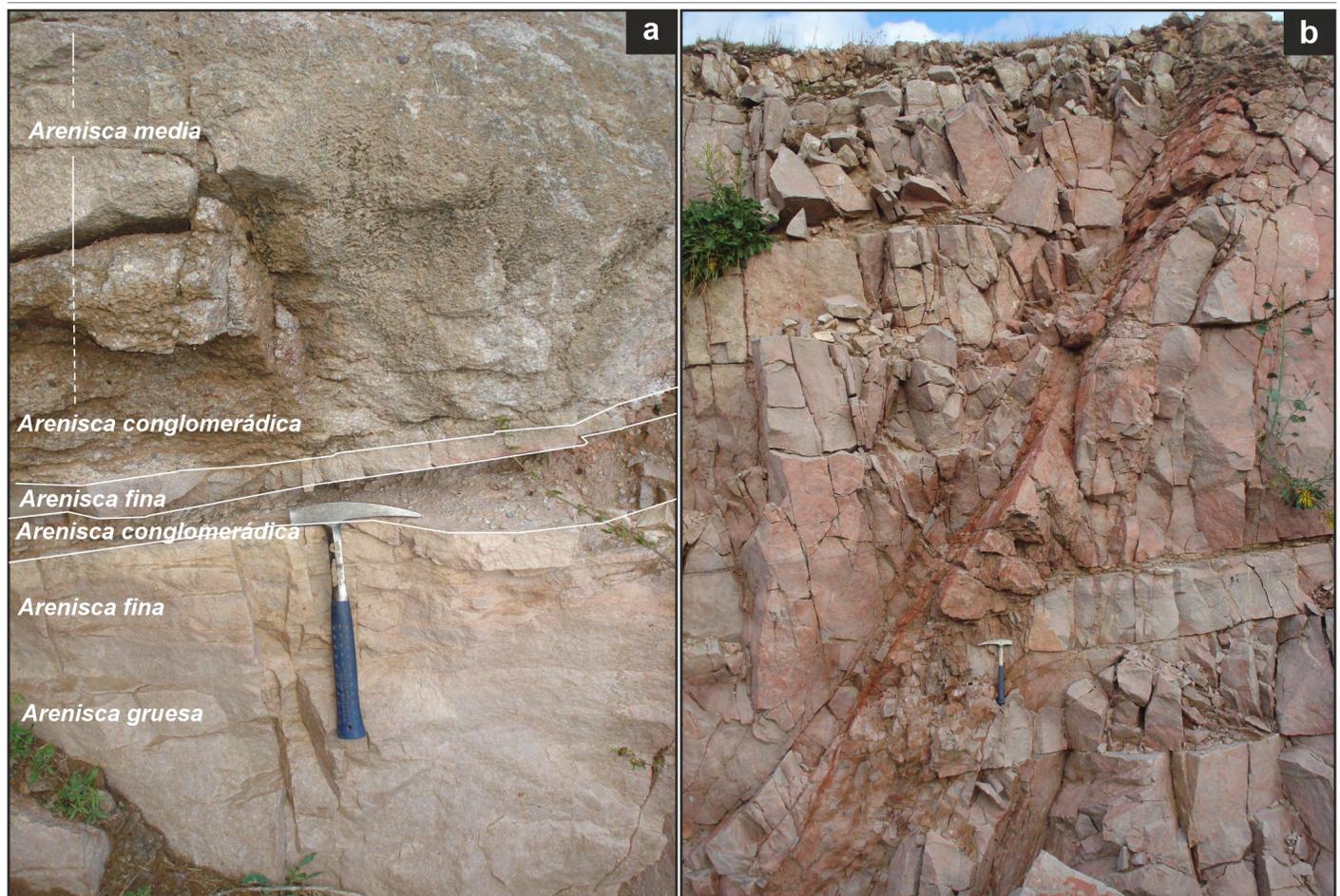
A partir de la predominancia relativa de areniscas sobre conglomerados y las diferencias estructurales observadas, se interpreta que los frentes expuestos en la cantera Ferrero y Sampacho se correlacionan con los miembros Sampacho y Suco, respectivamente.

En las canteras estudiadas, se distinguieron cuatro variedades litológicas predominantes sobre la base de observaciones de campo (color de la roca, tamaño de partícula, geometría de los bancos, entre otros). Si bien todas ellas se clasifican sedimentológicamente como sublitoarenitas y litoarenitas, en este trabajo se denominan informalmente como: 1) areniscas grises; 2) areniscas moradas; 3) areniscas conglomerádicas; y 4) areniscas finas. A continuación, se describen sus características.

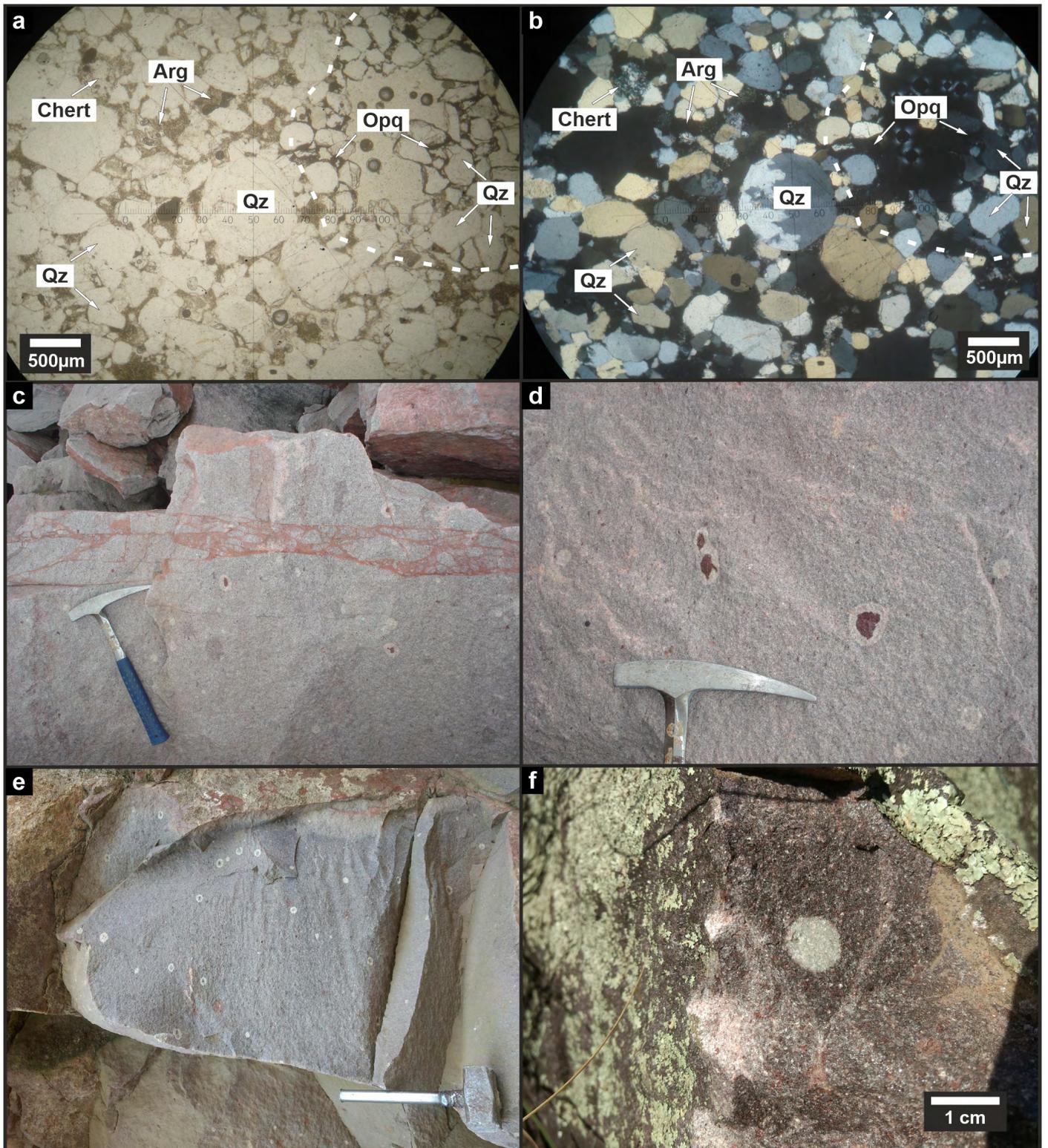
### Arenisca gris

Constituye el tipo litológico ampliamente dominante de la formación. Es de color gris, de estructura maciza, con textura clástica inequigranular, clasto-soportada, de empaquetamiento completo, pero no cerrado, con una porosidad moderadamente alta (7.2 %). A pesar de su empaquetamiento y porosidad, la roca muestra alta tenacidad.

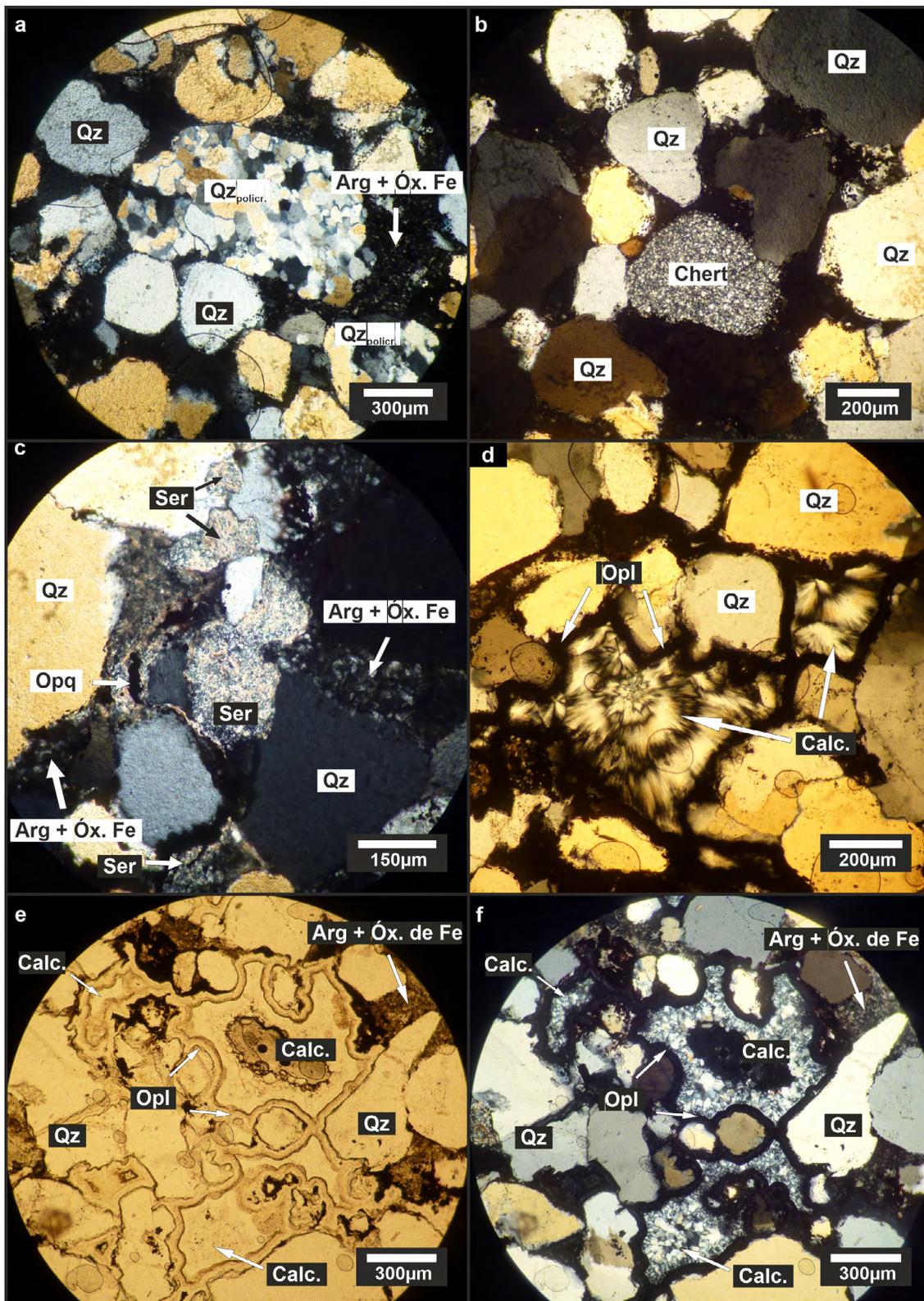
Los clastos presentan comúnmente tamaños de entre 0.4 y 1.0 mm (arenas medias y gruesas), aunque los menores y mayores alcanzan los 0.2 (arenas finas) y 2.5 mm (gravas) respectivamente. Son subredondeados a subangulosos, poseen forma subsférica u ovoide, con contactos netos, tangenciales a rectos (Figs. 6a y b). Se observaron ejemplos de procesos de disolución por presión en los bordes de grano y crecimiento secundario de cuarzo. Los clastos son principalmente de cuarzo (86.5 %), líticos de rocas cuarcíticas retransportadas (cuarzo policristalino y microcristalino -chert-) (8.4 %) y feldespatos (5.1 %), la mayoría de los cuales se ha-



**Figura 5.** Areniscas de la cantera Ferrero: a) Ampliación de un sector del perfil de la figura 4 donde se manifiesta claramente gradación normal. En el sector inferior, se halla una arenisca gruesa que grada a una fina la cual es cortada por erosión. Suprayaciendo se observan bancos de poco espesor de areniscas conglomerádicas y de areniscas finas. Por encima, se apoya un paquete de mayor espesor con areniscas conglomerádicas en la base que gradan a areniscas medias; b) Fracturación frágil moderna que genera una zona de falla con numerosas vetillas de óxido de hierro que le confieren alta friabilidad a la roca en ese sector. Altura de piqueta: 32.5 cm.



**Figura 6.** Areniscas de la formación Los Ranqueles en la cantera Sampacho: a-b) Aspecto de la arenisca gris a escala microscópica, sin y con analizador, respectivamente. Se puede observar la textura clástica con clastos de cuarzo (Qz) y chert subredondeados y subangulosos y la porosidad parcialmente rellena de argilominerales (Arg). Se remarca el límite inferido de una mota, dentro de la cual sólo se encuentran minerales opacos (Opq), seguramente óxidos de hierro, como cemento; c) Fisuras rellenas de trozos relictos de la arenisca gris original brechada y cementada con un mineral rojizo (posiblemente óxidos de hierro) (ancho de cabeza de piqueta 17.5 cm, altura de piqueta 32.5 cm); d) Motas distintivas de la arenisca gris con un núcleo rojizo de minerales opacos y una aureola blanquecina. Nótese algunas motas solamente de color blanco; e) Arenisca morada. Foto del único frente de explotación donde se identificó esta litología en la cantera Sampacho (altura de maza 28 cm); f) Máculas características de color blanco en la arenisca morada debido al cambio en la coloración del cemento.



**Figura 7.** Microfotografías de la arenisca morada de la cantera Sompacho: a) Clastos líticos de cuarzo policristalino. Se observa también el cemento formado por argilominerales y óxidos de hierro (muestra 2); b) Clasto de cuarzo microcristalino (chert) (muestra 2); c) Clasto de feldespato totalmente alterado a sericita, conformando pseudomatriz (muestra 2); d-f) Calcedonia y ópalo relleno los espacios vacíos y disminuyendo la porosidad de la roca (muestra 1). Referencias: Qz: Cuarzo; Chert: clasto de cuarzo microcristalino o chert; Qz<sub>policr.</sub>: clasto de cuarzo policristalino; Calc.: Calcedonia; Opl: Ópalo; Ser: Sericita; Arg: Argilominerales; Óx. de Fe: Óxidos de hierro; Opq: Opacos.

llan completamente alterados a sericita, conformando pseudomatriz y, en ocasiones, epimatriz (Marfil y Caja, 2010). También se hallaron menos del 0.2 % de clastos de circón muy redondeados y esféricos, de tamaños menores a 0.2

mm. La matriz está ausente y los clastos están aglomerados solamente por el cemento. No se detectó la presencia de carbonatos. El cemento está conformado principalmente por argilominerales (posiblemente caolinita), ocasionalmente

asociados a óxidos de hierro. Se halla rellenando los poros dejados por el esqueleto granular constituyendo alrededor del 13 % de la roca. Además, en los contactos entre algunos granos se observa cemento de cuarzo secundario.

En muchos sectores los afloramientos se tornan de color rosado debido a la presencia de óxidos de hierro en patinas o rellenando pequeñas microfisuras (menos de 1 mm), debilidad por la que habitualmente rompe la roca. En ocasiones, estas microfisuras cortan y brechan varios estratos generando franjas de hasta 15 cm de espesor en las que queda la arenisca como bloques relícticos angulosos inalterados rodeados de un cemento rojizo de óxidos de hierro (Fig. 6c). Como característica distintiva, presentan motas de óxido de hierro distribuidas aleatoriamente (Fig. 6d), las cuales son generalmente de tamaños menores a 5 cm, con un núcleo de color rojizo y aureolas blanquecinas alrededor, aunque a veces sólo se observan como manchas blancas en la roca

(Fig. 6d). Dentro de los límites de las motas, se observan minerales opacos (seguramente óxidos de hierro) como único mineral cementante mientras que los clastos son de características similares al resto de la roca (Fig. 6a y 6b). En la aureola blanquecina que rodea a las motas, no se observaron cambios mineralógicos, sólo de coloración en escala mesoscópica.

La roca se clasifica como sublitoarenita gruesa a media moderadamente a bien seleccionada, con textura submadura a madura (Folk et al. 1970, Folk 1974). En el cuadro 1 se presentan los porcentajes composicionales de los clastos, cemento y porosidad, y la moda mineral total de todas las muestras estudiadas.

### Arenisca morada

En el sector norte de la cantera Sampacho, limitada a un solo frente de explotación y subyaciendo estratigráficamente

**Cuadro 1.** Cuento modal de composición de clastos, porosidad, cementación y minerales en las sedimentitas de la Formación Los Ranqueles, realizado bajo microscopio óptico.

MUESTRA	CANTERA SAMPACHO			CANTERA FERRERO	
	Arenisca Gris	Arenisca Morada 1	Arenisca Morada 2	Arenisca conglomerádica	Arenisca fina
<b>COMPOSICIÓN DE CLASTOS</b>					
Cuarzo monomineral	86.5%	87.1%	88.7%	73.4%	88.1%
Fragmentos líticos (incluido chert)	8.4%	12.0%	7.7%	25.0%	8.5%
Feldespatos	5.1%	1.0%	3.6%	1.5%	3.4%
CLASIFICACIÓN (según Folk et al. 1970)	Sublitoarenita gruesa a media	Sublitoarenita gruesa a media	Sublitoarenita gruesa a media	Litoarenita gruesa conglomerádica	Sublitoarenita media a fina
<b>CEMENTACIÓN Y POROSIDAD</b>					
Cantidad	13.6%	17.5%	36.7%	4.7%	13.2%
CEMENTO Tipo	Argilomin. ± Óx. de Fe	Argilomin. ± Óx. de Fe	Ópalo; Argilomin. ± Óx. de Fe	Argilomin. ± Óx. de Fe	Argilomin. ± Óx. de Fe; Qz secund.
POROSIDAD (por conteo modal de poros)	7.2%	5.7%	2.2%	17.4%	13.2%
<b>CONTEO MODAL MINERALÓGICO</b>					
Cuarzo no deformado	74.6%	68.2%	50.9%	69.8%	73.1%
Cuarzo con extinción lamelar suave a intensa	---	2.7%	3.6%	4.3%	0.9%
Cuarzo policristalino	3.9%	7.1%	2.2%	6.3%	5.2%
Cuarzo microcristalino	2.4%	1.8%	6.6%	5.6%	2.0%
Feldespatos	0.4%	0.1%	0.9%	0.3%	---
Ópalo	---	---	20.6%	---	---
Argilominerales (caolinita?) + óxidos de Fe ± Qz micr.	14.3%	16.5%	11.6%	11.0%	18.1%
Sericita (no asociada a otros minerales)	3.9%	0.9%	2.3%	1.3%	---
Circón	0.1%	0.1%	0.0%	---	---
Opacos	0.4%	2.6%	1.2%	---	0.9%

a la arenisca gris, se identificó una arenisca con un marcado color morado (Fig. 6e). Dicho color está dado por la abundante presencia de óxidos de hierro en el cemento, asociados a argilominerales. El cuarzo se halla en cristales transparentes y se destacan motas distintivas similares a las descriptas en la arenisca gris, pero de color solamente blanco (Fig. 6f). La roca presenta mayor tenacidad, textura de grano medio a grueso, sin esquistosidad ni foliación y menor porosidad. Los clastos son subangulosos a subredondeados, de esfericidad variable desde baja a alta, de tamaños desde 0.2 a 1.5 milímetros, con contactos tangenciales a rectos. Están conformados principalmente por granos de cuarzo monomineral de extinción normal a levemente ondulante (88.7 %) (Fig. 7a y b). También se observan clastos líticos (7.7 %) compuestos de cuarzo policristalinos y microcristalinos (Fig. 7a y b) y cristales de feldespatos (3.6 %), la mayoría de los cuales se hallan alterados completamente a sericita conformando pseudomatriz (Fig. 7c). Se observaron clastos dispersos de circón (menor al 0.1 %). La matriz clástica es inexistente. El cemento está formado principalmente por argilominerales asociados a abundantes minerales opacos, seguramente óxidos de hierro (Fig. 7c, 7e y 7f). En algunas muestras se observa calcedonia con textura zebraica (4.5 %) y gran cantidad de ópalo (20 %) como cementos rellenando el espacio poral (Fig. 7d-f). Estos minerales disminuyen notablemente la porosidad final de la roca de 5.7 % a 2.2 % (Cuadro 1) y le otorgan una mayor tenacidad. También se detectó la presencia de crecimiento secundario de cuarzo en los bordes de grano. Esta variedad litológica se clasifica como sublitoarenita media moderadamente a bien seleccionada, con textura submadura a madura (Folk et al. 1970, Folk 1974).

### **Arenisca conglomerádica**

Las areniscas conglomerádicas se observaron solamente en la cantera Ferrero, donde la variabilidad litológica es mayor en comparación con la cantera Sampacho. En general, son de color blanco con manchas oscuras y son friables. Se desarrollan localmente en la base de estructuras en artesa, con un espesor que no supera los 15 cm disminuyendo hasta desaparecer hacia los bordes. Los clastos son redondeados a subredondeados, subesféricos y están compuestos por cuarzo monomineral (73.6 %), abundantes líticos (25.0 %) y escasos feldespatos (1.5 %). Son predominantemente de tamaño de 0.5 a 1.7 mm (arena gruesa a muy gruesa), aunque se cuantificó la presencia de un 18% de gravas menores a 3 mm (gránulos). Los fragmentos líticos componen los clastos de mayor tamaño y son de diversa naturaleza: arenitas cuarcíticas de grano grueso con clastos de cuarzo y chert con contactos poligonales; gneises de grano fino, limolitas

retransportadas. El cemento está constituido por argilominerales asociados a óxidos de hierro que rellenan parcialmente el espacio poral y por cuarzo secundario creciendo en los contactos intergranulares. La porosidad final de esta variedad litológica (17.4 %) es mayor a la de las demás areniscas (Cuadro 1). Se clasifica como litoarenita gruesa conglomerádica, moderadamente seleccionada, con textura submadura (Folk et al. 1970, Folk 1974).

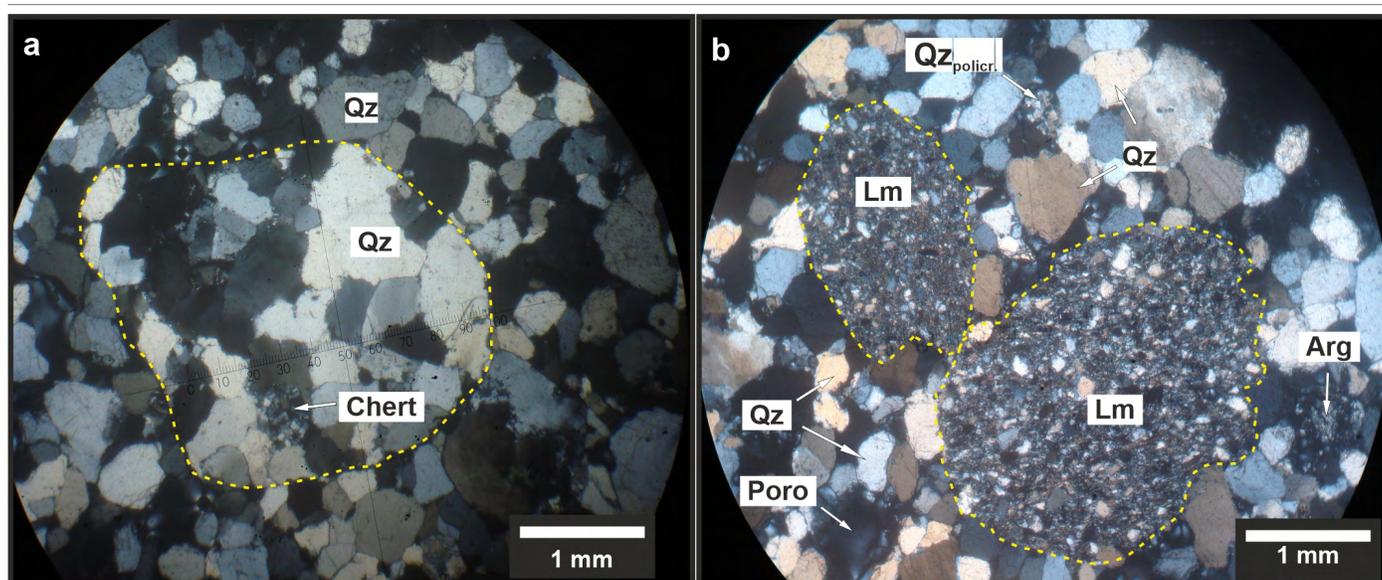
### **Arenisca fina**

Esta variedad litológica fue utilizada localmente como 'piedra de afilar'. Es abundante en la cantera Ferrero, mientras que en la cantera Sampacho aflora en un frente particular. Son areniscas medias a finas, de color blanco o pardo amarillento, dispuestas en bancos compactos de espesor constante, generalmente menores a 1.5 m, homogéneos y de estructura maciza. En ocasiones, se presentan coronando los estratos por una disminución del tamaño de grano. Presentan una laminación horizontal mal definida, marcada por la imbricación de granos ovoides de cuarzo. El moteado descrito en otras variedades está ausente. Los clastos son predominantemente de tamaño de 0.1 a 0.5 mm, compuestos por cuarzo monomineral (88.1 %), líticos de chert y cuarzo policristalino (8.5 %) y escasos feldespatos (3.4 %) completamente alterados a sericita, conformando una pseudomatriz. Los contactos entre clastos son rectos, ocasionalmente cóncavo convexos. La matriz clástica está ausente y no presenta motas. El cemento ocupa un 13.2 % de la roca y está conformado principalmente por argilominerales y óxidos de hierro rellenando poros. Es notorio un proceso mucho más avanzado de crecimiento secundario de cuarzo en continuidad óptica en los contactos entre intergranulares en sectores puntuales de la sección delgada. No obstante, la porosidad de estas areniscas finas (13.2 %) es considerablemente mayor a la de las areniscas gruesas (Cuadro 1). La roca se clasifica como sublitoarenita media a fina, bien seleccionada, con textura madura (Folk et al. 1970, Folk 1974).

## **CARACTERIZACIÓN TÉCNICA**

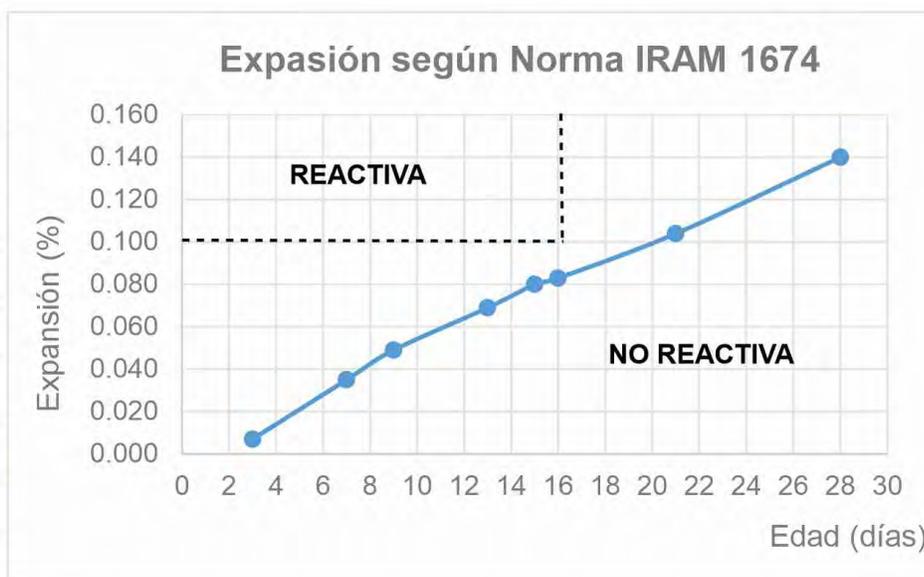
### **Ensayos de comportamiento de las areniscas grises frente a la reacción álcali-silice en morteros y hormigones de cemento Portland**

Para caracterizar la arenisca gris frente a la reacción álcali-silice, se realizaron todos los métodos de ensayos (IRAM 1674-1997 e IRAM 1700-2013 a 38 y 60 °C) de manera de poder detectar expansiones provocadas tanto por minerales de reacción rápida (como ópalo y calcedonia) como de reacción



**Figura 8.** Microfotografías de la arenisca conglomerádica de la cantera Ferrero: a) Se remarca con línea discontinua los límites de un clasto de arenita cuarcítica gruesa (conformada por granos de cuarzo y chert con contactos intergranulares poligonales); b) Clastos subangulosos de limolita (marcados en trazo discontinuo). Referencias: Qz: cuarzo; Qz<sub>poli-cr.</sub>: cuarzo policristalino; Arg: Argilominerales; Lm: Limolita.

Edad (Días)	Expansión (%)
3	0.007
7	0.035
9	0.049
13	0.069
15	0.080
<b>16</b>	<b>0.083</b>
21	0.104
28	0.140



**Figura 9.** Tabla de valores y gráfico de días vs. porcentaje de expansión de las barras de mortero ensayadas según Norma IRAM 1674 (1997).

lenta (como el cuarzo tensionado o microcristalino).

En la figura 9 se presentan los resultados de la expansión generada en barras de mortero de acuerdo a la Norma IRAM 1674 (1997) (Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra del mortero). Si la curva de expansión de un agregado interseca el campo delimitado por la línea de puntos, se considera reactiva. Como puede observarse, las barras de mortero no superan el 0.1 % de expansión a 16 días que establece la Norma IRAM 1531 (2016), por lo que las areniscas grises de la cantera Sampacho se consideran no reactivas según la Norma IRAM 1674 (1997).

En la figura 10 se presentan los resultados de la expan-

sión de los prismas de hormigón sometidos a 60°C según la norma IRAM 1700 (2013) (método acelerado), cuya expansión se evalúa a 13 semanas. De acuerdo a los valores obtenidos, las areniscas grises se consideran no reactivas según este método ya que los prismas de hormigón no superan el 0.08 % de expansión a 13 semanas que establece la Norma IRAM 1531 (2016).

En la figura 11 se presentan los resultados de la expansión de los prismas de hormigón sometidos a 38 °C según la norma IRAM 1700 (2013) (método tradicional). En este gráfico puede observarse que los valores de expansión, si bien fueron variando sin un aparente patrón, están muy por debajo

Edad (Semanas)	Expansión (%)
5	0.014
10	0.015
<b>13</b>	<b>0.018</b>
15	0.018
20	0.019

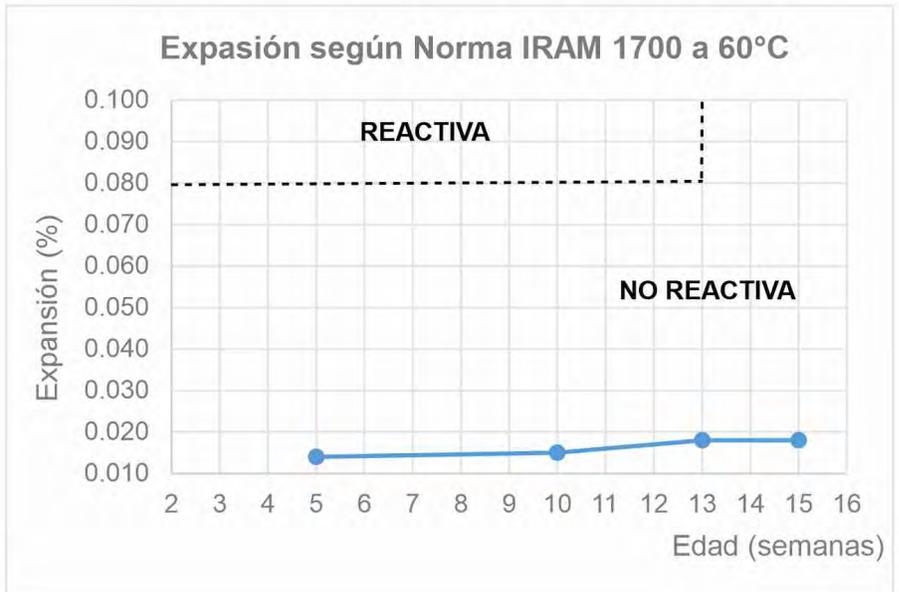


Figura 10. Tabla de valores y gráfico de edad vs. porcentaje de expansión de los prismas de hormigón ensayados según Norma IRAM 1700 (2013) a 60 °C (método acelerado).

Edad (Semanas)	Expansión (%)
1	0.005
2	0.011
4	0.008
8	0.008
13	0.003
18	0.004
26	0.003
39	0.007
45	0.002
<b>52</b>	<b>0.011</b>

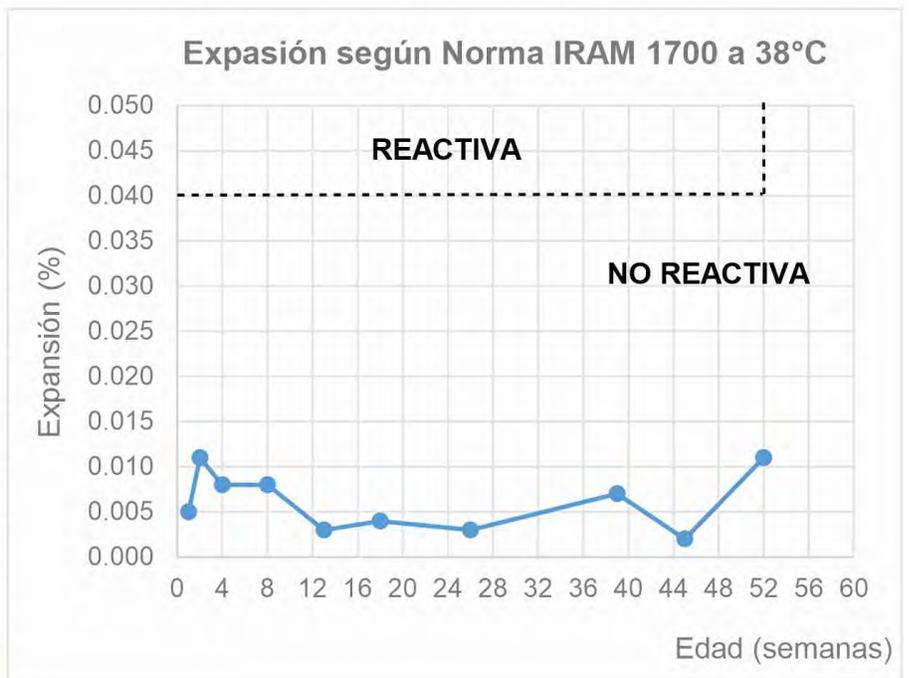


Figura 11. Tabla de valores y gráfico de edad vs. porcentaje de expansión de los prismas de hormigón ensayados según Norma IRAM 1700 (2013) a 38 °C (método tradicional)

del límite máximo establecido por la norma correspondiente. Los prismas de hormigón no superan el 0.04 % de expansión a 52 semanas que establece la Norma IRAM 1531 (2016), por lo que las areniscas grises de la cantera Sampacho se consideran no reactivas según la Norma IRAM 1700 (2013) a 38 °C. Este método es el más confiable y determinante: el resultado del mismo es definitivo para descartar la posible reactividad de este agregado.

### Ensayos físico-mecánicos

La arenisca gris se muestreó en una voladura reciente realizada en el frente de mayor extensión de la cantera Sampacho. La muestra de arenisca morada fue tomada de un pequeño acopio de material triturado en bloques de aproximadamente 8 cm, ubicado en una de las labores de la cantera Sampacho y claramente correlacionable a las rocas del frente contiguo, donde fue identificado este tipo litológico.

Con estas muestras se realizaron los ensayos físicos básicos de caracterización (coeficiente Los Ángeles, peso específico aparente, absorción, lajosidad y elongación). Se obtuvieron valores bajos de peso específico aparente (menores a 2.58) y valores altos de absorción (mayores 2.0 %) (Cuadro 2). Estos resultados son coherentes con su empaquetamiento y alta porosidad. Con material de las mismas muestras originales, se realizaron ensayos de determinación de la resistencia a la fragmentación por el método "Los Ángeles" en las gradaciones A y B, que involucran agregados de 9.5 a 37.5 mm y de 9.5 a 19 mm, respectivamente. Los resultados obtenidos (Cuadro 3) fueron de un coeficiente Los Ángeles de 42 % para la arenisca gris en la gradación B con partículas de forma no controlada (mayor lajosidad y elongación), de 38 % para la misma gradación y forma seleccionada, de 39 % para la gradación A y de 30 % para la arenisca morada.

## DISCUSIÓN

### Comportamiento frente a la reacción álcali-sílice

La reacción álcali-sílice es una reacción química que ocurre en el hormigón cuando se presentan simultáneamente varias condiciones (Maldonado y Carrasco 2012): a) la presencia de un agregado que contenga minerales deletéreos como ópalo, calcedonia, cuarzo microcristalino o fuertemente tensionado, entre otros; b) una concentración mínima de iones alcalinos en el líquido de poros del hormigón; c) la presencia de humedad elevada (mayor al 80 %), permanente o periódica; d) una temperatura del ambiente normal (no muy baja) que rodea al hormigón; e) tiempo para que la reacción se desarrolle. El producto de la reacción es un gel hidrofílico

**Cuadro 2.** Pesos específicos y absorción de las areniscas grises y moradas de la cantera Sampacho según norma VN-E13-67 (1998).

VALOR	Arenisca gris	Arenisca Morada
Peso Específico Aparente (PEA)	2.572	2.544
Peso Específico del agregado seco (PEAS)	2.412	2.416
Peso Específico del agregado Saturado (PEASat)	2.474	2.466
Absorción	2.58 %	2.08 %

que incrementa su volumen al absorber agua. Esta expansión, genera tensiones de tracción internas en el hormigón que pueden provocar su fisuración y el posible colapso de la estructura, por lo que detectar su posible ocurrencia es fundamental a la hora de decidir la utilización de un agregado en una obra en particular. Las Normas IRAM 1531 (2016) y 1649 (2008) establecen límites aceptables de cada mineral deletéreo y los procedimientos a seguir en caso de que un agregado sea clasificado como potencialmente reactivo. La primera norma mencionada establece que, si un agregado supera los valores límites indicados, o si se hallan dos o más minerales deletéreos juntos sin importar en qué porcentajes, debe clasificarse como potencialmente reactivo.

Sobre la base del análisis petrográfico, todas las areniscas de la Formación Los Ranqueles estudiadas son clasificadas como potencialmente reactivas según la norma IRAM 1531 (2016). La arenisca gris de la cantera Sampacho debe ser clasificada como potencialmente reactiva frente a la reacción álcali-sílice, ya que contiene más del 5 % de cuarzo microcristalino + policristalino. En cuanto a la arenisca morada,

**Cuadro 3.** Coeficiente Los Ángeles, lajosidad y elongación de las areniscas grises y moradas de la cantera Sampacho.

CANTERA	MUESTRA	GRADACIÓN	CLA	LAJOSIDAD	ELONG.
Cantera Sampacho	Arenisca gris – Forma NO seleccionada	B (9.5-19 mm)	42 %	Pas ¾"-Ret ½"	36.0
				Pas ½"-Ret 3/8"	44.1
Cantera Sampacho	Arenisca gris – forma seleccionada	B (9.5-19 mm)	38 %	Pas ¾"-Ret ½"	9.0
				Pas ½"-Ret 3/8"	21.0
				Pas 1 ½"-Ret 1"	10.9
Cantera Sampacho	Arenisca gris – Forma NO seleccionada	A (9.5-37.5 mm)	39 %	Pas 1"-Ret ¾"	7.1
				Pas ¾"-Ret ½"	5.9
				Pas ½"-Ret 3/8"	17.1
Cantera Sampacho	Arenisca morada – Forma NO seleccionada	B (9.5-19 mm)	30 %	-	-

De los últimos dos parámetros, se presentan los valores parciales de cada fracción. Es necesario destacar la notable mayor lajosidad y elongación de las muestras de forma no seleccionada respecto a las de agregados de forma controlada, especialmente en la fracción Pas ½"-Ret 3/8".

también debe clasificarse como potencialmente reactiva ya que presenta ópalo y cuarzo microcristalino en simultáneo, sumado a que cada uno individualmente supera los valores límites especificados (0.5 % y 5 % respectivamente). Según la mencionada norma, para poder utilizar la roca en hormigones, se debe proceder a evaluar la reactividad alcalina del agregado por alguno de los siguientes métodos: Método acelerado de la barra de morteros (IRAM 1674-1997) o Método del prisma de hormigón a 38 y 60°C (IRAM 1700-2013). En la norma IRAM 1531 (2016) se establece que, si las barras de mortero (IRAM 1674-1997) muestran una expansión mayor a 0.10 % a 16 días, se considera al agregado como potencialmente reactivo y se deben tomar algunas de las medidas de prevención de la reacción álcali-sílice (detalladas en Norma IRAM 1531-2016 - Anexo A) en caso que se haga efectivo su uso en una obra. No obstante, este método no es determinante ya que no detecta la expansión generada por minerales de reacción "lenta", como el cuarzo tensionado (Falcone y Milanesi, 2012). Por lo tanto, en caso que la expansión sea menor a lo mencionado, se deben esperar los resultados obtenidos en el método del prisma de hormigón para el mismo agregado. Por otro lado, si los prismas de hormigón (IRAM 1700-2013) sometidos a 38°C muestran una expansión mayor a 0.04 % a las 52 semanas o si los prismas sometidos a 60°C muestran más del 0.08 % de expansión a las 13 semanas, se considera al agregado como potencialmente reactivo y se deben tomar las medidas de prevención. En caso que la expansión sea menor a lo mencionado, el agregado se puede usar sin restricciones.

Los resultados obtenidos en los ensayos de expansión de la arenisca gris de la cantera Sampacho indican que no es reactiva en ninguno de los métodos ensayados, por lo que puede ser utilizada en hormigones y morteros de cemento Portland sin restricciones con relación a su reactividad frente a la reacción álcali-sílice. Este resultado es coherente con la petrografía observada en este tipo de arenisca. El método acelerado de la barra de mortero evalúa principalmente la reacción álcali-sílice generada por minerales de reacción rápida (ópalo, calcedonia, etc.) (Falcone y Milanesi 2012, Coelho dos Santos 2018). En la arenisca gris no se detectó la presencia de estos minerales, por lo que el resultado de expansión por debajo de los límites admitidos es acorde con su mineralogía. Por otro lado, los métodos del prisma de hormigón, detectan la reacción álcali-sílice generada por minerales de reacción lenta (Falcone y Milanesi 2012, Coelho dos Santos 2018), como el cuarzo microcristalino y el fuertemente tensionado. Si bien según la norma IRAM 1531 (2016) la arenisca gris es calificada como potencialmente reactiva porque supera el valor máximo admitido de cuarzo microcristalino + policristalino

(5 %), la proporción modal medida de estos minerales es apenas superior (6.3 %) al límite mencionado. Por lo tanto, los resultados obtenidos (no reactiva) también son coherentes con la mineralogía cuantificada. Coelho dos Santos (2018) presenta un estudio de diferentes sedimentitas cuarzosas de diversas canteras de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires, todas ellas pertenecientes a la Formación Balcarce, las cuales presentan similitud petrográfica y mineralógica con las sedimentitas de la Formación Los Ranqueles. En dicho estudio, los valores de expansión por reacción álcali-sílice en todos los métodos son correlacionables con la mineralogía: aquellas rocas que presentan minerales de letéreos por debajo de los valores especificados en la norma IRAM 1531 (2016) resultaron no reactivas. Solamente reporta reactividad en una muestra cuyo contenido de cuarzo fuertemente tensionado + cuarzo microcristalino es de 5.3 %, muy similar a las areniscas grises de la Formación Los Ranqueles. No obstante, la diferencia en los resultados de los ensayos de reactividad se explica por la presencia de un 1.4 % de ópalo en la muestra estudiada por dicha autora, mineral ausente en las areniscas grises de la cantera Sampacho.

Por otro lado, se conocen antecedentes de areniscas de color morado en Argentina cuya característica común es la presencia de calcedonia u ópalo como cemento. Marfil et al. (2012), describen una arenisca cuarzoza en la provincia de Corrientes, la cual resultó ser altamente reactiva frente a la reacción álcali-sílice en el método de la barra de mortero. En cuanto a las arcosas coloradas de la cantera Cuatro Pozos, en el sur de la provincia de San Luis, si bien no se realizaron ensayos de expansión por reacción álcali-sílice, Deguillén (2005) y Kostadinoff et al. (2006), reportan la presencia de calcedonia y ópalo como cemento, minerales de reacción rápida. En complemento, en el LEMIT existen antecedentes (Coelho dos Santos com. pers.) de ensayos de una "cuarcita morada de Córdoba" que presenta altos valores de expansión en todos los métodos, por la presencia de calcedonia y ópalo como mineral que cementa la estructura granular. Si bien no fue posible contar con los datos documentados de estos ensayos ni de la ubicación exacta donde se extrajo la muestra, se pudo observar el acopio actual de dicha roca: sus características petrográficas son altamente similares a la areniscas moradas de la Formación Los Ranqueles ensayadas en este trabajo, con el color morado característico, alto contenido de granos de cuarzo, cemento compuesto por un mineral rojizo de aspecto terroso y las distintivas máculas blancas generadas por un cambio focalizado de coloración del cuarzo y del cemento. No se conocen antecedentes de areniscas de similares características en otro sector de la provincia de Córdoba, por lo que podría considerarse que las "cuarcitas moradas

de Córdoba” del LEMIT corresponden a la arenisca morada de la cantera Sampacho. Aunque no fue posible evaluar esta litología frente a la reacción álcali-sílice, sobre la base de dichos antecedentes y sumado al alto porcentaje de ópalo (20.6 % en una muestra) y cuarzo microcristalino (alrededor del 6 %) cuantificados en el conteo modal, es probable que presente reactividad por encima de los límites permitidos en las normas correspondientes. Por lo tanto, es necesario realizar los ensayos de expansión antes de plantear un posible aprovechamiento de este sector de la cantera Sampacho para la fabricación de hormigones y morteros de Cemento Portland.

### Aptitudes de uso

Los ensayos de laboratorio evidencian que las areniscas de la Formación Los Ranqueles presentan alta absorción (mayor a 2.0 %) y bajo peso específico aparente (menor a 2.58) en comparación con las rocas habitualmente utilizadas para uso vial, cuyos peso específico aparente están comprendidos entre 2.6 y 3.1 y las absorciones son menores a 1.5 % (Saumench y Colombo 1983, 1988, IRAM 1531-2016, PETG-DNV 2017).

Para evaluar la aptitud de esta formación para su aplicación en la construcción, es necesario realizar la distinción entre las dos litologías ensayadas en la cantera Sampacho: areniscas grises y areniscas moradas. En relación con las grises, tomando como referencia los límites propuestos por los Pliegos Generales de Especificaciones Técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad (PETG-DNV 1998, 2017, FA 7058 1975) y por la Norma IRAM 1531 (2016), se concluye que son aptas para diversos usos, entre ellos, la ejecución de sub-bases granulares, sub-balasto, hormigones no sometidos a abrasión, premoldeados no estructurales, calzadas de hormigón de bajo tránsito (Índice de Tránsito menor a 199). En cuanto a la arenisca morada, además de los usos planteados para la gris, es apta para algunas aplicaciones más exigentes. De acuerdo al PETG-DNV (2017) y la FA 7040 (1975), el coeficiente Los Ángeles cumple la especificación para balastos, bases granulares, pavimentos de hormigón con Índices de tránsito (IT) menores a 1200, concreto asfáltico grueso de base (“base negra”) de cualquier IT y carpetas asfálticas de rodamiento de IT menor a 199 (bajo tránsito). Por otro lado, se desconoce la potencialidad de esta variedad frente a la reacción álcali-sílice, por lo que es necesario realizar los ensayos de reactividad antes de ser aplicada en la fabricación de hormigones de cemento Portland. Además, en ambos casos, se confirma que su resistencia es suficiente para la aplicación en gaviones, escolleras y otras obras de contención hidráulica, para lo cual se viene utilizando actualmente.

Los usos mencionados suelen demandar un gran volumen

de material en las obras civiles y son las aplicaciones posibles de acuerdo a la normativa actual. No obstante, se puede plantear la posibilidad de utilizar estas areniscas en usos más exigentes que los especificados. Para ello, estas rocas deben calificarse y abordarse como material de “calidad marginal”, es decir, aquel que no cumple todas las especificaciones de la normativa vigente, pero por un margen estrecho. En Argentina y el mundo se conocen diversos ejemplos referidos al estudio y la aplicación de agregados de calidad marginal con buenos resultados. Entre ellos se pueden mencionar los trabajos de Bin et al. (2017, 2021) quienes estudiaron escombreras de mármoles en la provincia de Córdoba donde, a pesar de que el coeficiente Los Ángeles y el examen petrográfico no cumplen la normativa vigente, las bases granulares conformadas con estos materiales mostraron una capacidad portante suficiente para ser utilizadas en estructuras de pavimento habituales. Poklepovic y Silva (2014) evalúan la utilización de calcretes o toscas del sur de la provincia de Córdoba para la ejecución de bases y sub-bases granulares de carreteras. Estos materiales presentan alta absorción (cerca de 7 %), bajo peso específico (de 2.14 a 2.21) y coeficiente Los Ángeles entre 33 y 38 %, por lo que se clasificarían como de calidad marginal. No obstante, la capacidad de soporte de las capas, medida mediante el valor soporte relativo, supera en todos los casos lo solicitado por la normativa vigente para este tipo de estructuras, constituyendo una alternativa técnicamente viable con algunas adaptaciones en el diseño de las obras. Por otro lado, Angelone et al. (2005) proponen ensayos y especifican criterios para la selección de canteras de basaltos alterados de la provincia de Misiones, demostrando que, con un adecuado estudio técnico previo, se pueden lograr capas de bases y sub-bases granulares, conformadas con basaltos altamente meteorizados, que ofrezcan adecuadas prestaciones en una estructura de pavimento. Finalmente, los estudios de Franesqui et al. (2015, 2019) y García-González et al. (2020) en rocas volcánicas de las Islas Canarias, España, caracterizan y clasifican los diferentes agregados de calidad marginal de ese ambiente volcánico complejo y proponen alternativas para la utilización de los mismos en la infraestructura vial. En base a una numerosa base de datos, estos autores recomiendan la utilización de los materiales piroclásticos (li-vianos y con alta absorción de agua) para sub-bases drenantes, la aplicación de agregados de alta porosidad, como las rocas vesiculares y escorias volcánicas, en bases granulares y pavimentos, mientras que sugieren, en lo posible, reservar los materiales masivos (rocas volcánicas no porosas) para los usos más exigentes como carpetas asfálticas de rodamiento. Estos trabajos, entre otros ejemplos, demuestran que muchas veces es posible la utilización de materiales de calidad

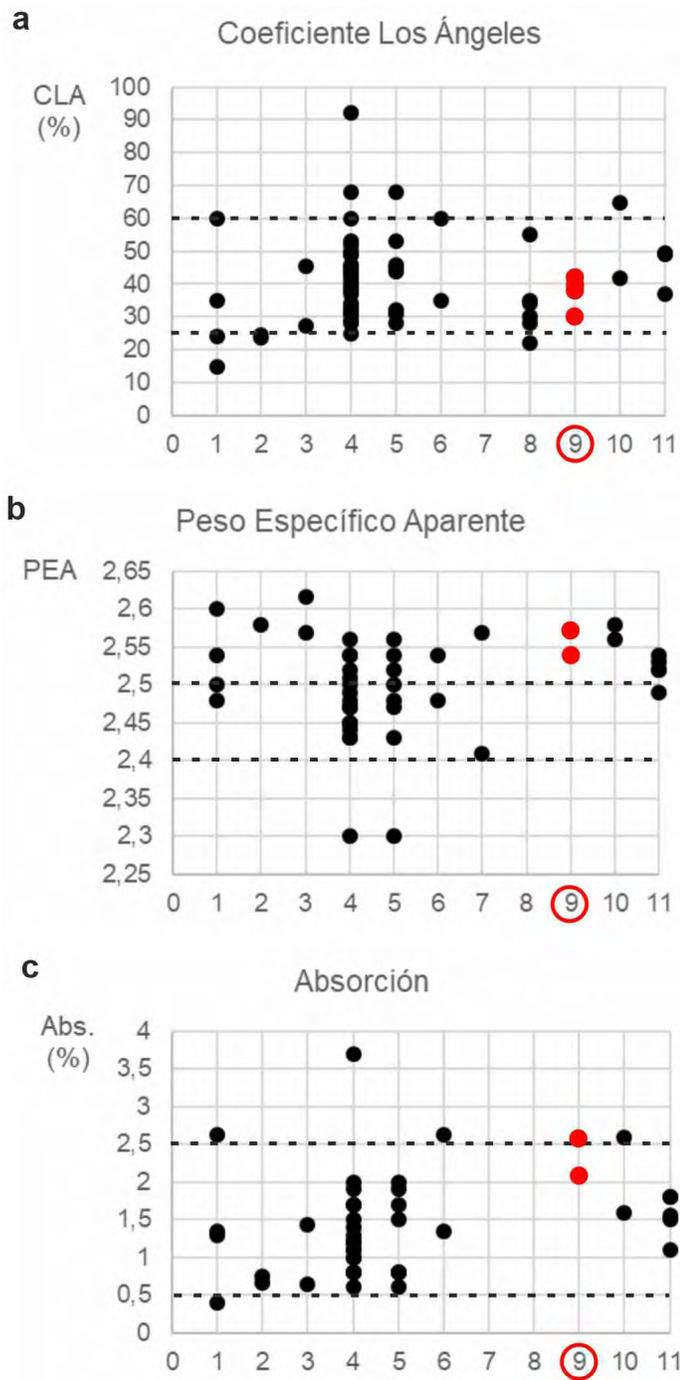
marginal para ciertas estructuras sin afectar el desempeño de las mismas, solamente incorporando ciertas adaptaciones y recaudos en su diseño y construcción. Por lo tanto, además de los numerosos usos que permite la normativa actual, las areniscas grises de la Formación Los Ranqueles podrían ser consideradas para estructuras de mayores requerimientos, siempre que se corrobore su aptitud con estudios técnicos específicos previos. La utilización de este tipo de materiales permitiría a los organismos públicos y empresas involucradas en las obras de la región avanzar hacia una explotación racional y sustentable en el tiempo de los recursos pétreos, reservando los materiales de mayores prestaciones para los usos más exigentes.

Además de los aspectos técnicos, las areniscas de la cantera Sampacho presentan algunas ventajas y desventajas de índole geológicas y económicas. Como característica favorable se puede mencionar su ubicación estratégica, factor de gran relevancia en las rocas de aplicación, cercana a los centros de consumo más importantes de la región y a ciudades que pueden ser fuente de recursos humanos. Además, presenta una excelente accesibilidad con caminos consolida-

dos de salida directa a rutas pavimentadas de importancia nacional y provincial y a vías férreas activas. En complemento, el volumen de roca disponible es suficiente para desarrollar un emprendimiento de explotación de agregados. El estudio geológico-topográfico de Macías (1981) reporta más de 2300000 toneladas de reservas comprobadas de relieve positivo de areniscas en la cantera Sampacho solamente y otras 600000 toneladas de reservas probables. En contrapartida, entre las limitantes se puede mencionar la variabilidad observada entre los diferentes frentes de explotación, incluso dentro de la misma cantera, lo cual puede traducirse en productos de calidades diferentes ante una eventual producción comercial. Además, el tipo litológico que mejor comportamiento físico-mecánico presentó (arenisca morada) aflora en un sector muy reducido y su extracción es dificultosa ya que suprayace la arenisca gris. Por otro lado, la mineralogía, predominantemente conformada por cuarzo, podría significar un alto poder abrasivo para el acero de la maquinaria de trituración (Metso 2008, Ferro Rodríguez 2019), lo cual es económicamente desfavorable. También, los materiales finos (< 6 mm) resultantes de la trituración de la arenisca gris serían

**Cuadro 4.** Rangos de valores de los diferentes parámetros analizados, tomados de otros autores.

ROCA	REFERENCIA	GRADACIÓN	CLA	PEA	ABS.	OBSERVAC.
Rocas Cuarcíticas de la provincia de Buenos Aires (formación Balcarce y Cuarcitas de Pigüé)	Anón Suárez et al. (1971)	B (9.5-19 mm)	28-68 %	2.30-2.56	0.6-3.7 %	Los valores más frecuentes son: CLA=30-50 %, PEA=2.43-2.52 y Abs=1-2 %. Controlando el índice de lajas, los CLA bajan entre 2-13 %
	Angelelli et al. (1973)	B (9.5-19 mm)	31-68 %	2.30-2.56	0.6-2.0 %	
	Saumench y Colombo (1983)	B (9.5-19 mm)	45.5 %	2.517	1.44 %	Ortocuarcita (sedimentaria)
	Saumench y Colombo (1983)	B (9.5-19 mm)	27.1 %	2.616	0.64 %	Cuarcita (metamórfica)
	Saumench y Colombo (1988)	B (9.5-19 mm)	15-24 %	2.5-2.6	0.4-1.3 %	Rocas cuarcíticas (metamórficas)
	Andreoni et al. (2005)	C (4.75-9.5 mm)	28 y 55 %	---	---	Rocas definidas como "Cuarcitas"
Cuarcitas de Chaco	Coelho dos Santos (2018)	B (9.5-19 mm)	37-49.5 %	2.49-2.52	1.1-1.8 %	Arenitas cuarzosas, vaques y fangolitas de la Fm. Balcarce
	Andreoni et al. (2005)	C (4.75-9.5 mm)	35 %	---	---	Rocas definidas como "Cuarcitas"
Cuarcitas de Santiago del Estero	Saumench y Colombo (1988), Andreoni et al. (2005)	B (9.5-19 mm)	31-60 %	2.48-2.54	1.35-2.62 %	Areniscas cuarcíticas (sedimentarias)
	Andreoni et al. (2005)	C (4.75-9.5 mm)	22 y 34 %	---	---	Rocas definidas como "Cuarcitas"
Arcosas del sur de San Luis (cantera Cuatro Pozos)	Deguillén (2005) (*)	B (9.5-19 mm)	23.8-24.6 %	2.58	0.66-0.74 %	Rocas definidas como "Arcosas"
	Andreoni et al. (2005), Kostadinoff et al. (2006)	C (4.75-9.5 mm)	30 %	2.41-2.57	----	Rocas definidas como "Arcosas"
Areniscas de la Fm. Los Ranqueles (cantera Ferrero)	Datos inéditos	A (9.5-37.5 mm)	41.7-64.9 %	2.56-2.58	1.6-2.6 %	Muestras extraídas de cantera Ferrero



**Figura 12.** Gráficos de a) Coeficientes Los Ángeles (%) b) Peso Específico Aparente (adimensional) y c) Absorción (%), donde se representan los valores reportados en la literatura de ensayos de laboratorio realizados en areniscas y metacuarcitas de diferentes sitios de Argentina. Nótese que los valores obtenidos en este trabajo (N°9) se hallan dentro de los rangos habituales, es decir, los valores obtenidos en el 80 a 90 % de las muestras reportadas, a excepción de un valor de absorción. Estos rangos están delimitados con línea de puntos y son 25-60 %, 2.40-2.60 y 0.5-2.50 % para el CLA, PEA y absorción, respectivamente. Referencias: 1: Saumench y Colombo (1988); 2: Deguillén (2005); 3: Saumench y Colombo (1983); 4: Anón Suárez et al. (1971); 5: Angelelli et al. (1973); 6: Saumench y Colombo (1988); 7: Kostadinoff et al. (2006); 8: Andreoni et al. (2005); 9: Este trabajo; 10: Datos inéditos; 11: Coelho dos Santos (2018).

difícultosos de comercializar ya que los usos planteados para esta roca consumen mayor volumen de fracción gruesa en comparación con la fina. Por lo tanto, esto puede derivar en muy bajos precios de venta del material 0 - 6 mm o, en su defecto, en la acumulación de escombreras.

### Control petrográfico del comportamiento físico-mecánico

Los estudios realizados por otros autores sobre arenita cuarzosas y metacuarcitas de la provincia de Buenos Aires (Anón Suárez et al. 1971, Angelelli et al. 1973, Saumench y Colombo 1983, 1988, Andreoni et al. 2005, Coelho dos Santos 2018), cuarcitas de Santiago del Estero y Chaco (Saumench y Colombo 1988, Andreoni et al. 2005), arcosas del sur de San Luis (Andreoni et al. 2005, Deguillén 2005, Kostadinoff et al. 2006) y sobre muestras de areniscas pertenecientes a la Formación Los Ranqueles extraídas de la cantera Ferrero (datos inéditos), evidencian que este tipo de rocas presentan, en la mayoría de los casos (entre el 80 y 90 % de las muestras reportadas), valores de coeficiente Los Ángeles comprendidos entre 25 y 60 %, peso específico aparente entre 2.40 y 2.60, y absorciones de 0.5 a 2.5 %, con algunas excepciones puntuales (Cuadro 4 y Fig.12 a-c). Las areniscas grises de la Formación Los Ranqueles son semejantes petrográficamente a algunos estratos de la Formación Balcarce, en las Sierras de Tandilia (Coelho dos Santos y Falcone 2012, Coelho dos Santos et al. 2014, 2017, Coelho dos Santos 2015, 2018, Berezosky et al. 2016), cuya similitud petrográfica también se ve reflejada en valores parecidos de coeficiente Los Ángeles, pesos específicos y absorciones. Por lo tanto, los datos obtenidos en las areniscas de la Formación Los Ranqueles no discrepan de los de otras rocas de similares características mineralógicas, petrográficas y/o genéticas del país. A partir del análisis de la relación entre las características petrográficas descriptas y la resistencia mecánica de las areniscas mencionadas, se puede observar que las de empaquetamiento más cerrado, mayor contacto entre granos, mayor grado de cementación y menor porosidad, presentan menor coeficiente Los Ángeles y absorción. Por ejemplo, las metacuarcitas de Pigüé, las cuales presentan empaquetamiento muy cerrado, baja porosidad, bordes recristalizados y suturados y cementación avanzada con cuarzo (Saumench y Colombo 1983, 1988), son las que menor coeficiente Los Ángeles (entre 15 % y 24 %) y absorción (menor a 1.5 %) presentan de todas las rocas cuarcíticas reportadas de Argentina.

Todo lo mencionado sugiere que el comportamiento físico-mecánico de las areniscas de la Formación Los Ranqueles está principalmente controlado por sus características petrográficas (mineralogía, textura, tamaño de grano, empa-

quetamiento, porosidad, microfracturación, alteración, etc.). Este fenómeno también ha sido estudiado y reportado en diferentes tipos de rocas por Tuğrul y Zarif (1999), Åkesson et al. (2001, 2003), Miskovsky et al. (2004), Sun et al. (2017), Ajalloeian y Kamani (2017), Giannakopoulou et al. (2016, 2018a y 2018b), Petrounias et al. (2018a y 2018b), Apaydin y Yilmaz (2021), Andomako et al. (2021), entre otros, y, específicamente en areniscas, por Shakoor y Bonelli (1991), Bell y Lindsay (1999), Zorlu et al. (2008), Tuğrul y Yilmaz (2012), Yilmaz y Tuğrul (2012), Maharjan (2015), Coelho dos Santos (2018) y Petrounias et al. (2020). En las areniscas en particular, muchas investigaciones coinciden en que la porosidad es el principal factor que condiciona la resistencia a la fragmentación o el valor de coeficiente Los Ángeles resultante (Shakoor y Bonelli 1991, Bell y Lindsay 1999, Zorlu et al. 2008, Petrounias et al. 2020), así como también influye en gran medida el grado de cementación y la mineralogía del cemento. En este último caso, la mayor presencia de cemento arcilloso genera menor resistencia a la fragmentación (es decir, mayor coeficiente Los Ángeles), mientras que a mayor contenido de cuarzo constituyendo el cemento suele aumentar la resistencia a la fragmentación (Bell y Lindsay 1999, Zorlu et al. 2008, Tuğrul y Yilmaz 2012, Yilmaz y Tuğrul 2012). En el caso de las areniscas grises de la Formación Los Ranqueles, la textura clástica, el empaquetamiento parcialmente abierto, la alta porosidad y cementación incompleta generada por minerales poco resistentes como son las arcillas y escaso cuarzo, explican los valores de resistencia obtenidos en los ensayos de laboratorio (coeficiente Los Ángeles de 38 a 42 %). En cambio, en la arenisca morada el grado más avanzado de cementación dado por minerales de mayor dureza como el cuarzo microcristalino y el ópalo, disminuye notoriamente la porosidad (de 7.2 % en la arenisca gris a 2.2 % en la morada) y aumenta la resistencia mecánica de la roca, lo cual se evidencia en los más bajos valores de coeficiente Los Ángeles (30 %, 10 % menos en promedio que la arenisca gris).

Otro factor que influye en el desempeño mecánico de la roca es el tamaño de los granos (Shakoor y Bonelli 1991, Tuğrul y Zarif 1999, Petrounias et al. 2020, Andomako et al. 2021), así como la forma de los agregados, parámetros definidos principalmente por la granulometría y los índices de lajosidad y elongación (Anón Suárez et al. 1971, Andreoni et al. 2005, Prowell et al. 2005). Al comparar los valores de coeficiente Los Ángeles, se debe considerar la gradación ensayada porque, si bien el procedimiento contempla que al menor tamaño de fracciones se disminuye la cantidad de esferas de acero a introducir en la máquina "Los Ángeles", se han hallado reportes que indican que el coeficiente Los Ángeles en la gradación A es menor al de la B (Andreoni et al. 2005), de-

pendiendo de las características litológicas. En este caso, el valor obtenido para las areniscas grises de la cantera Sampa-cho en la gradación A (39 %) es levemente inferior a la B (42 %), ambas con partículas de forma no controlada (Cuadro 3). Por otro lado, los ensayos de resistencia a la fragmentación muestran que el coeficiente Los Ángeles disminuye cuando es menor la lajosidad y la elongación. En las areniscas grises se observó una disminución de 42 % a 38 % en el coeficiente Los Ángeles en la misma muestra y gradación al controlar la forma de las partículas involucrados en el ensayo. Sin embargo, en concordancia con otros estudios (Anón Suárez et al. 1971, Arm 2003), la variación observada en este trabajo (4 %) no resultó sustancial, lo que sugiere que el comportamiento físico-mecánico de las areniscas está vinculado principalmente a sus características mineralógicas y texturales, y no a la forma de los agregados.

## CONCLUSIONES

La ubicación estratégica respecto a los centros de consumo de agregados de la región, la excelente accesibilidad de las canteras, la buena exposición de los frentes, el alto tonelaje de roca disponible y la aptitud adecuada para numerosas aplicaciones dentro de la construcción, hacen de las areniscas de la Formación Los Ranqueles un material que debe ser considerado en el diseño de nuevas estructuras y proyectos civiles. Se deben tener en cuenta los usos correspondientes en cada tipo litológico: las areniscas grises son aptas para sub-bases granulares, sub-balasto, hormigones no sometidos a abrasión, premoldeados no estructurales, calzadas de hormigón de bajo tránsito, gaviones, escolleras y otras obras de contención hidráulica; las moradas, además de los usos planeados para las anteriores, son aptas para balastos, bases granulares, pavimentos de hormigón de medio a bajo tránsito, concreto asfáltico grueso de base ("base negra") de cualquier nivel de tránsito y carpetas asfálticas de rodamiento de bajo tránsito.

La presente investigación evidencia que rocas pertenecientes a la misma formación geológica, e incluso a la misma cantera, pueden tener cambios sustanciales que modifiquen notoriamente su aptitud y aplicación. Por lo tanto, se demuestra que los estudios geológicos y petrográficos, y la caracterización técnica previa a su utilización, son fundamentales en todo aprovechamiento de recursos pétreos, de manera de asegurar una explotación racional y sustentable, evitar futuras patologías en las estructuras civiles, optimizar los recursos, racionalizar su uso y utilizar cada litología para la aplicación adecuada.

## AGRADECIMIENTOS

Esta contribución se enmarca en una beca doctoral co-financiada entre CONICET y la empresa constructora Incisa S.A., en la que participan también docentes/investigadores del Depto. de Geología de la UNRC y el ICBA, y cuenta con la colaboración de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba. Los autores agradecen a las instituciones públicas y privadas involucradas. El trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos PICT 2707/2018 (FONCyT) y PPI C514 (SeCyT-UNRC).

El editor agradece el trabajo de revisión de Rita O. Tófaló y Alejandro E. Celli.

## REFERENCIAS

- Ajalloeian, R. y Kamani, M. 2017. An investigation of the relationship between Los Angeles abrasion loss and rock texture for carbonate aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*: 1-9.
- Åkesson U., Lindqvist J., Göransson M. y Stigh J. 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 60(4): 277-284.
- Åkesson, U., Stigh, J., Lindqvist, J.E. y Göransson, M. 2003. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology* 68 (3-4): 275-288.
- Andomako, S., Engelsen, C.J., Thorstensen, R.T. y Barbieri, D.M. 2021. Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro-Deval tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80: 1963-1980.
- Andreoni, R., Giovanón, O., Pagola, M., Ruiz, M.D., Santamaría, E., Tcharin, W. y Tello, R. 2005. Análisis de agregados pétreos provenientes de canteras comerciales. 14° Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Actas en CD, C5-T173, Buenos Aires.
- Angelelli, V., Villa, J. y Suriano, J. 1973. Recursos minerales y rocas de aplicación de la provincia de Buenos Aires. *Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigación Tecnológica (LEMIT), Anales* 2: 1-204.
- Angelone, S., Córdoba, R.R., Escobar, J.A., Schvezov, C.E. y Siviero, N. 2005. Alterabilidad de basaltos y su influencia en las propiedades geomecánicas. 14° Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Actas C5-T048, Buenos Aires.
- Anón Suárez, H., Mauriño, V.E. y Massaccesi D.D. 1971. Cualidades físico-mecánicas de las ortocuarzitas de la provincia de Buenos Aires. Su empleo en obras viales y civiles, 1a. sección: Chapadmalal. *Anales LEMIT* 4, Serie II, 198: 75-114.
- Apaydin, Ö.F. y Yılmaz, M. 2021. Correlation of petrographic and chemical characteristics with strength and durability of basalts as railway aggregates determined by ballast fouling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80: 4197-4205.
- Arm, M. 2003. *Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials*. Thesis Doctoral. The Royal Institute of Technology, 248 p., Stockholm.
- Astini, R.A. y Del Papa, C.E. 2014. Cubierta sedimentaria Paleozoica superior. En: Martino, R.D. y Guereschi, A.B. (eds.), *Relatorio del 19° Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba*. Asociación Geológica Argentina, Part I: 393-419, Córdoba.
- Azcuy, C.L., Andreis, R.R., Cuerda, A., Hünicken, M.A., Pensa, M.V., Valencio, D.A. y Vilas, J.F. 1987. Cuenca Paganzo. En: Archangelsky, S. (ed.), *El Sistema Carbonífero en la República Argentina*. Academia Nacional de Ciencias, 41-100. Córdoba.
- Azcuy, C.L., Carrizo, H.A. y Caminos, R. 1999. Capítulo 12. Carbonífero y Pérmico de las Sierras Pampeanas, Famatina, Precordillera, Cordillera Frontal y Bloque San Rafael. En Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*. Anales Instituto de Geología y Recursos Minerales, 26 (11): 261-317. Buenos Aires.
- Bell, F. y Lindsay, P. 1999. The petrographic and geomechanical properties of some sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban, South Africa. *Engineering Geology* 53(1): 57-81.
- Berezovsky, J.J., Falcone, D., Lescano, L., Madsen, L., Marfil, S.A. y Maiza, P.J. 2016. Comportamiento frente a la RAS de los materiales utilizados como agregado grueso en la zona de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. 7° Congreso Internacional – 21° Reunión Técnica de la AATH, Actas: 373-380, Salta.
- Bin, I.H. 2021. Estudio de nuevas fuentes de provisión de agregados, ubicadas en el centro-sur de la provincia de Córdoba, para su utilización en la fabricación de hormigones, mezclas asfálticas y capas granulares. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 275 p., Río Cuarto.
- Bin, I.H., Poklepovic, M.F., Demartis, M. y Coniglio, J.E. 2017. Caracterización petrográfica y físico-mecánica de cuarzoarenitas del sur de Córdoba para su utilización como agregado en hormigones, mezclas asfálticas y capas granulares. 3° Congreso Argentino de Áridos, Actas: 87-95, Córdoba.
- Bin, I.H., Poklepovic, M. F., Coniglio, J. E., Demartis, M., Pinotti, L., D'Eramo, F. y Carranza, F. 2018. La industria vial como una alternativa de mitigación ambiental: caracterización de escombreras de mármoles para su aprovechamiento en capas granulares, Las Caleras, Córdoba. 1° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería, Actas (digital), San Luis.
- Bin, I.H., Poklepovic, M.F., Coniglio, J.E., Demartis, M., Carranza, F., Pinotti, L.P. y D'Eramo, F.J. 2021. Evaluación de escombreras de mármoles para su aprovechamiento como agregado en una estructura de pavimento, Córdoba, Argentina. *Informes de la Construcción* 73(561): e378.
- Bodenbender, G. 1905. La sierra de Córdoba: constitución geológica y productos minerales de aplicación. *Anales del Ministerio de Agricultura* 1(2): 1-146, Buenos Aires.

- Bodenbender, G. 1929. Triásico y Terciario en la falda oriental de la Sierra de Córdoba. Relaciones morfológico- tectónicas. Rocas volcánicas. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias 31 (1-2): 73- 140, Córdoba.
- Bonalumi, A., Sfragulla, J., Locati, F. y Campos, D. 2009. Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción. Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 23: 17-26.
- Calegari, R.J., Chebli, G., Manoni, R.S. y Lázari, V. 2014. Cuencas cretácicas de la región central del país: General Levalle. En: Martino R.D., Guerreschi A.B. (eds) Geología y Recursos Naturales de la provincia de Córdoba, Relatorio del 19° Congreso Geológico Argentino. Asociación Geológica Argentina: 913-937, Córdoba.
- Castro Dorado, A. 1989. Petrografía básica. Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. Paraninfo, 143 p. Madrid.
- Chebli, G.A., Mozetic, M.E, Rossello, E.A. y Bühler, M. 1999. Cuencas Sedimentarias de la llanura Chacopampeana. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Geología Argentina, Anales 29 (19): 613-626, Buenos Aires.
- Chebli, G.A., Spalletti, L.A., Rivarola, D., de Elorriaga, E. y Webster, R.E. 2005. Cuencas cretácicas de la región central de la Argentina. En: Chebli, G., Cortiñas, J., Spalletti, L., Legarreta, L. y Vallejo, E. (eds.) Simposio Frontera Exploratoria de la Argentina, 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Capítulo 9: 193-215, Buenos Aires.
- Coelho dos Santos, G.S. 2015. Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales (Tandil) frente a la RAS. Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT 5: 7-15.
- Coelho dos Santos G.S. 2018. Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali – sílice (RAS). Universidad Nacional del Sur. Tesis doctoral (inédita), 323 p., Bahía Blanca
- Coelho dos Santos, G.S. y Falcone, D.D. 2012. Reacción álcali-agregado en areniscas cuarzosas de la Formación Las Piedritas (Chaco) y cuarcitas de la Formación Balcarce (Buenos Aires), utilizadas como agregados para hormigón. 13° Reunión Argentina de Sedimentología: 53-54, Salta.
- Coelho dos Santos, G.S., Marfil S.A. y Maiza, P. 2014. Influencia de las características texturales y mineralógicas de la cuarcita Mar del Plata en su comportamiento como agregado de hormigón. 2° Congreso Argentino de Áridos, Actas: 367-378, Buenos Aires.
- Coelho dos Santos G.S., Marfil S., Falcone D. y Maiza P. 2017. Estudio petrográfico de rocas cuarcíticas del área de Balcarce (provincia de Buenos Aires). Factibilidad de uso como agregado para hormigón. 3° Congreso Argentino de Áridos, Actas: 104-109, Córdoba.
- Deguillén, A.O. 2005. Descripción de Roca de aplicación: Material de Yacimiento Los Cuatro Pozos, provincia de San Luis. Dirección Provincial de Vialidad de La Pampa. Informe técnico a la empresa Michelotti e Hijos S.R.L. (inédito), 6 p.
- FA 7040 1975. "Especificación FA. 7040. Balasto Grado "A", Departamento Normalización y Métodos, Ferrocarriles Argentinos, Argentina
- FA 7058 1975. "Especificación FA. 7058. Balasto Grado "B", "C", "D" y "E", Departamento Normalización y Métodos, Ferrocarriles Argentinos, Argentina
- Falcone, D. y Milanese, C.A. 2012. Método acelerado del prisma de hormigón. Evaluación de la RAS con agregados de diversas regiones de la Argentina. 5° Congreso Internacional y 19° Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca.
- Fernández Seveso, F., Alvarez, L.A., Pérez, M.A. y Rodríguez, E. 1988. Sistemas depositacionales de las sedimentitas eopérmicas de Bajo de Veliz, Tasa Cuna y Arroyo Totoral. 2° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas 1: 90-94, Buenos Aires.
- Ferro Rodriguez, D. 2019. Caracterización de rocas desde el punto de vista de su abrasividad. "Un estudio de caso". Diseño prototipo máquina para determinación del DRI (índice de la tasa de perforabilidad). Tesis de Magister en Infraestructura Vial, Universidad Santo Tomas de Aquino (inédito), 178 p., Bogotá.
- Folk, R.L. 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemphills Publishing Company, 170 p., Austin.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. y Lewis, D.W. 1970. Detrital Sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland. New Zeland Journal of Geology and Geophysics 13: 937-968.
- Franesqui, M. A., Yepes, J., García-González, C., Gallego, J. y Pérez, I. 2015. Áridos de islas volcánicas para capas granulares de firmes de carreteras. 4° Congreso Nacional de Áridos, Actas C: 507-519, Madrid.
- Franesqui, M. A., Yepes, J. y García-González, C. 2019. Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen. Construction and Building Materials 201: 328-339.
- Frías, R., Quintana, E., Bonalumi, A.A. y Sfragulla J.A. 2001. La obra vial, generadora del desarrollo regional sustentable. 13° Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Actas: 1-19, Buenos Aires.
- García-González, C., Yepes, J. y Franesqui, M. A. 2020. Geomechanical characterization of volcanic aggregates for paving construction applications and correlation with the rock properties. Transportation Geotechnics 24: 100383.
- Gentile, L. 2008. Caracterización técnico-geológica de áridos del sur de Córdoba para su aplicación en carpetas de concreto asfáltico. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 145 p., Río Cuarto
- Giannakopoulou, P.P., Tsikouras, B. y Hatzipanagiotou, K. 2016. The interdependence of mechanical properties and petrographic characteristics of ultramafic rocks from gerania ophiolitic complex. Bulletin of the Geological Society of Greece 50(4): 1829-1837.
- Giannakopoulou P., Petrounias P., Rogkala A., Tsikouras B., Stamatis P., Pomonis P. y Hatzipanagiotou K. 2018a. The influence of the minera-

- logical composition of ultramafic rocks on their engineering performance: a case study from the Veria-Naousa and Gerania ophiolite complexes (Greece). *Geosciences* 8: 251.
- Giannakopoulou, P.P., Petrounias, P., Tsikouras, B., Kalaitzidis, S., Rogkala, A., Hatzipanagiotou, K. y Tombros, S.F. 2018b. Using factor analysis to determine the interrelationships between the engineering properties of aggregates from igneous rocks in Greece. *Minerals* 8: 580.
- Gordillo, C.E. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En: Turner, J.C.M. (ed.), 2º Simposio de Geología Regional Argentina 1. Academia Nacional de Ciencias, 577-650, Córdoba.
- Gutiérrez, P.R. 2008. Los Ranqueles (Formación...). En: Gutiérrez, P.R. (ed.), *Léxico Estratigráfico de la Argentina*, Vol. 6, Carbonífero. Asociación Geológica Argentina, Serie "B" (Didáctica y Complementaria) N° 30; Servicio Geológico Minero Argentino, Publicación N° 169: 113-114, Buenos Aires.
- Hünicken, M.A. y Pensa, M.V. 1980. Formación Los Ranqueles (Carbonífero) de Sampacho y Cerro Suco en el sudoeste de Córdoba. IUGS-UNESCO, Project N° 42. Reunión de Comunicaciones de San Juan, Boletín 3: 5-6, San Juan.
- Hünicken, M., Azcuy, C. y Pensa, M. 1981. Sedimentitas Paleozoicas. En: Yrigoyen, M.R. (ed.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia de San Luis*. Relatorio 8º Congreso Geológico Argentino, 74-75, San Luis.
- IRAM 1509 1987. Agregados para hormigones. Muestreo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1531 2016. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1532 2009. Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método 'Los Ángeles'. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1649 2008. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Agregados. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1674 1997. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra del mortero. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1687-1 1996. Agregados. Método de determinación del índice de lajosidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1687-2 1997. Agregados. Determinación del índice de elongación. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1700 2013. Agregados. Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM 1702 1981. Agregados gruesos para uso vial. Método de análisis del estado físico de la roca. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 10 p.
- IRAM 1703 1981. Agregados gruesos para uso vial. Características basadas en el análisis del estado físico de la roca. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 6 p.
- Kostadinoff, J., Gregori, D., Raniolo, L.A., López, V. y Strazzere, L. 2006. Configuración geológica-geofísica del sector sur de la provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 107-117.
- Locati, F., Marfil, S., Batic, O. y Baldo, E. 2010. Rocas de las sierras de Córdoba como agregados para el hormigón. Comportamiento frente a la reacción Alkali-Sílice (RAS). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*: 13-24, Ciudad de Buenos Aires.
- Macías, C.A. 1981. Estudio Geológico Cantera: "Sampacho". Tesis final de licenciatura. Universidad Nacional de Río Cuarto (inédito), 42 p., Río Cuarto.
- Maharjan, P. 2015. Texture and index properties of rocks from Malekhu-Thopal Khola area, Central Nepal Lesser Himalaya. *Bulletin of the Department of Geology* 18 (1): 1-14
- Maldonado, N.G. y Carrasco, M.F. 2012. Ese material llamado hormigón. *Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH)*, 366 p., Buenos Aires.
- Marfil R. y Caja Rodríguez M. Á. 2010. Diagénesis de rocas detríticas. En: Arche, A. (ed.), *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 1045-1104, Madrid.
- Marfil, S., Batic O. y Maiza, P. 2012. Petrography of potentially alkali-reactive sandstone from Argentina. *Proceedings of the 14th ICAAR, Austin/TX*, 8 pp, electronic.
- Metso 2008. Manual de trituración y cribado de Metso. 3ra edición. 322 pág. Recuperado de [https://www.academia.edu/26051679/Manual\\_de\\_Trituraci%C3%B3n\\_y\\_Cribado](https://www.academia.edu/26051679/Manual_de_Trituraci%C3%B3n_y_Cribado)
- Miskovsky, K., Tabora Duarte, M., Kou, S.Q. y Lindqvist, P.-A. 2004. Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates. *Journal of Materials Engineering and Performance* 13(2): 144-150.
- Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas (2016). Informes de cadenas de valor: Minería Metalífera y Rocas de Aplicación. Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas de la Nación Argentina. Recuperado de [https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/2017/SSPE\\_Cadena\\_de\\_Valor\\_Mineria.pdf](https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/2017/SSPE_Cadena_de_Valor_Mineria.pdf)
- Olsacher, J. 1935. El terremoto de Sampacho, provincia de Córdoba. *Revista del Museo de Ciencias Naturales* 1: 1-19.
- Pandolfi, C. L. de, 1938. Estudio petrográfico y bosquejo geológico de la región de Chaján, Sierra de Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 80 p., Buenos Aires.
- Pastore, F. 1938. Descripción geológica de la provincia de Córdoba. Comisión Nacional de Climatología, Agricultura y Minería de la República Argentina 7: 21-49, Buenos Aires.
- PETG-DNV 1998. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales (1998). Vialidad Nacional, Ministerio de Transporte, República Argentina. Publicación 101/102. 353 pág. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/dnv\\_petg\\_1998\\_0.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/dnv_petg_1998_0.pdf)

- PETG-DNV 2017. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Vialidad Nacional, Ministerio de Transporte, República Argentina. 69 pág. <https://www.argentina.gob.ar/transporte/vialidad-nacional/licitaciones/pliegos-de-especificaciones-tecnicas>
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P.P., Rogkala, A., Lampropoulou, P., Koutsopoulou, E., Papoulis, D., Tsikouras, B. y Hatzipanagiotou, K. 2018a. The impact of secondary phyllosilicate minerals on the engineering properties of various igneous aggregates from Greece. *Minerals* 8: 329.
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P.P., Rogkala, A., Stamatis, P.M., Lampropoulou, P., Tsikouras, B. y Hatzipanagiotou, K. 2018b. The effect of petrographic characteristics and physico-mechanical properties of aggregates on the quality of concrete. *Minerals* 8: 577.
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Kalpogiannaki, M., Koutsovitis, P., Damoulianou, M.-E. y Koukouzas, N. 2020. Petrographic Characteristics of Sandstones as a Basis to Evaluate Their Suitability in Construction and Energy Storage Applications. A Case Study from Klepa Nafpaktias (Central Western Greece). *Energies* 13: 1119.
- Poklepovic, M.F. y Silva, R. 2014. Calcretes: fuente de provisión de agregados de regiones semiáridas. Criterios para su implementación como material pétreo en obras viales. 2° Congreso Argentino de Áridos, Actas 2: 501-511, Buenos Aires.
- Poklepovic, M.F., Silva, R.I. y Quintana, E. 2009. Requerimientos para una correcta aplicabilidad de los controles de calidad en los triturados pétreos en Córdoba, Argentina. 2° Congreso Nacional de Áridos, Actas: 125-127, Valencia.
- Prowell, B.D., Zhang, J. y Brown, E.R. 2005. Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt. NCHRP Report 539, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, 90 p. Washington, D.C.
- Saumench, S.H. y Colombo, J.J., 1983. Criterios para el empleo de agregados pétreos en pavimentos asfálticos. 2° Congreso Latinoamericano del Asfalto, Actas II: 92-115, Mar del Plata.
- Saumench, S.H. y Colombo J.J. 1988. Los agregados provenientes de canteras comerciales. 25° Reunión del Asfalto, Actas: 383-400, Córdoba.
- Shakoor, A., y Bonelli, R.E. 1991. Relationship Between Petrographic Characteristics, Engineering Index Properties, and Mechanical Properties of Selected Sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience* 28 (1): 55-71.
- Silva Brunelli, R.I., Quintana Crespo, E. y Poklepovic, M.F., 2009. Proyecto de exploración de nuevas áreas de provisión de agregados pétreos, provincia de Córdoba, Argentina. 2° Congreso Nacional de Áridos, Actas: 303-308, Valencia.
- Sosic, M.V.J. 1964. Descripción geológica de la Hoja 24h-Sierra del Morro (San Luis-Córdoba). Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 95, 44 p. Buenos Aires.
- Sun, W., Wang L. y Wang, Y. 2017. Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 11(3):322-328.
- Tuğrul, A. y Yılmaz, M. 2012. Assessing the quality of sandstones for use as aggregate in concrete. *Magazine of Concrete Research* 64(12): 1067-1078.
- Tuğrul, A. y Zarif, I. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology* 51(4): 303-317.
- VN - E13 - 67. 1998. Peso específico aparente y absorción de agregados pétreos gruesos. Normas de Ensayo, Dirección Nacional de Vialidad. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- VN - E38 - 86. 1998. Determinación de la lajosidad y elongación en agregados. Normas de Ensayo, Dirección Nacional de Vialidad. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- VN - E66 - 82. 1998. Análisis del tipo y calidad de la roca de los agregados gruesos. Normas de Ensayo, Dirección Nacional de Vialidad. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- VN - E67 - 75. 1998. Análisis del tipo y calidad de la roca de los agregados gruesos. Exigencias. Normas de Ensayo, Dirección Nacional de Vialidad. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- Webster, R.E., Chebli, G.A. y Fischer, J.F. 2004. General Levalle Basin, Argentina: a Frontier Lower Cretaceous Rift Basin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 88: 627-652.
- Yılmaz, M., y Tuğrul, A. 2012. The effects of different sandstone aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials* 35: 294-303.
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H.A. y Acikalın, S. 2008. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology* 96(3-4): 141-158.