



Trabajo Final de Grado de la Licenciatura en Geología



Determinación de propiedades petrofísicas y alterabilidad de diferentes rocas del Uruguay.

Sofía Bueno.

2016.

Tutor: Dr. Pedro Oyhantçabal^I.

Co-tutor: Dr. Marcos Musso^{II}.

^I Facultad de Ciencias, UdelaR.

^{II} Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Resumen

La estrategia de este trabajo consistió en seleccionar muestras representativas de distintos tipos de rocas (ígneas, sedimentaria y metamórfica) del Uruguay, para caracterizarlas mediante petrografía óptica, ensayos petrofísicos (porosidad, absorción de agua, densidad, velocidad de propagación de onda) y ensayos de alteración (humedecimiento y secado, y cristalización de sulfato de sodio). Con los datos obtenidos se correlacionaron los ensayos entre sí, donde se observó que arenisca, basalto y caliza presentaron porosidades altas (entre 4-20%), densidades más bajas y velocidades de propagación de onda bajas (entre 2000-4500 m/s aproximadamente), mostraron pérdida de material temprana cuando se le realizaron los ensayos de alteración. Las pizarras son rocas con porosidades cercanas a cero por ciento, densidades altas y velocidades de propagación de onda altas, que no mostraron grandes pérdidas de material. Como conclusión final se destaca la relevancia de la realización de estos ensayos al momento de utilizar rocas para obra civil u ornamental, ya que colocar una roca no adecuada para las condiciones a las que se expone, puede generar un gasto muy alto en mantenimiento o un daño irreversible en la misma. Además se muestra que con equipos comunes de laboratorio, más bajo presupuesto se pueden realizar ensayos petrofísicos y ensayos de alteración, y obtener resultados muy similares que los mismos ensayos realizados a nivel mundial en laboratorios mejor equipados y con mayor presupuesto.

ÍNDICE

Lista de Símbolos	X
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Generales	3
2.2. Específicos	3
3. Antecedentes	4
3.1. propiedades petrofísicas a nivel mundial	4
3.1.2. ensayos de alteración a nivel mundial	7
3.2. estudios petrofísicos en Uruguay	8
3.2.1. ensayos de alteración en Uruguay	9
4. Materiales y Metodología	11
4.1. Materiales Estudiados	11
4.1.2. Breve revisión bibliográfica de la geología de los materiales estudiados	12
4.2. Metodología	16
4.2.1. ensayos petrofísicos	16
4.2.2. ensayos de alteración	18
5. Resultados	21
5.1. Descripción Petrográfica	21
5.2. Resultado y análisis de los ensayos	34
5.2.1. ensayos petrofísicos	34
5.2.2. ensayos de alteración	41
6. Discusión y conclusiones	48
Anexo	I
Bibliografía.	
Agradecimientos.	

Lista de símbolos.

n : Porosidad.

w : Absorción de agua.

ρ : Densidad aparente.

ρ_{matriz} : Densidad de matriz

ρ_w : Densidad del agua.

V_t : Volumen total.

W_d : Peso seco.

W_w : Peso del agua.

W_{sat} : Peso saturado de la muestra.

W_{sab} : Peso de la muestra sumergida en agua.

1. INTRODUCCIÓN

El término “Petrofísica” fue creado con el fin de describir las propiedades físicas de las rocas de un yacimiento, en un primer momento se desarrolló para la exploración de hidrocarburos. Archie (1950), pionero en la aplicación del término Petrofísica, lo define como una disciplina que se encarga del estudio de las propiedades físicas de las rocas que están relacionadas con los poros y la distribución de fluidos en ellas. Esta definición se sigue manteniendo y los estudios petrofísicos no solo se aplican para la exploración de hidrocarburos, sino que también para rocas ornamentales y de construcción civil.

Las propiedades petrofísicas (porosidad, absorción de agua, densidad, entre otras), junto con la composición mineral y la fábrica, controlan las características de la roca que son el resultado de su génesis y los demás procesos geológicos, y/o tectónicos sufridos por las rocas a lo largo de su historia. Los ensayos de laboratorio pueden cuantificar las propiedades físicas de las rocas (Goodman 1989, González de Vallejo 2002).

Por otro lado, la relación entre las propiedades físicas y la fábrica (foliación metamórfica, capas sedimentarias, poros y microfisuración), son las responsables de su comportamiento frente a los diferentes agentes químicos y físicos que pueden causar su alteración (Lage Ladeira & Minette 1984b, Siegesmund & Snethlage 2010). Según Lage Ladeira & Minette (1984a) la alteración de las rocas es el cambio en sus propiedades físicas, químicas, geotécnicas o dinámicas, causado por agentes externos. Esos agentes pueden ser atmosféricos, fuerzas tectónicas, fuerzas dinámicas (explosiones) o cualquier otra fuerza que atenúe las fuerzas intermoleculares de los constituyentes mineralógicos (Lage Ladeira & Minette 1984a). La alteración se puede medir a través de ensayos específicos que se realizan para evaluar la

durabilidad de un material pétreo y simula la alteración que sufriría el material en determinadas condiciones externas (Benavente 2002).

La motivación de realizar este trabajo no es solamente aportar nuevos datos sobre las propiedades petrofísicas y de alteración que pueda presentar un grupo reducido de rocas, sino también es demostrar que con equipos comunes de laboratorio y bajo presupuesto se pueden realizar ensayos petrofísicos como porosidad, absorción de agua, densidad, velocidad de propagación de ondas sónicas y ensayos de alteración como humedecimiento y secado, y cristalización de sulfato de sodio.

Estos ensayos ayudan a crear una idea sobre el comportamiento que puede poseer la roca, tanto en afloramiento como si es expuesta por el hombre, frente a diversos agentes atmosféricos (temperatura, humedad, precipitaciones y viento).

Es importante resaltar que, si la roca se pretende usar como ornamental o para obra civil, además de estos ensayos, es necesario realizar otros ensayos más específicos (dependiendo del uso), como carga puntual, compresión uniaxial, Los Angeles, entre otros. La conjunción de estos ensayos con los petrofísicos simples permite determinar si una roca es apta o no para el uso ornamental o civil.

2. OBJETIVOS

2.1. Generales.

- Realizar la caracterización petrográfica y petrofísica de diferentes tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias) del Uruguay.
- Establecer correlaciones entre las propiedades petrográficas, petrofísicas y alterabilidad de los distintos tipos de rocas estudiados.

2.2. Específicos.

- Caracterizar petrográficamente los distintos tipos de rocas estudiadas.
- Modelar y ejecutar para su estudio los ensayos petrofísicos (porosidad, absorción de agua, densidad y desplazamiento de ondas de ultrasonido).
- Modelar y ejecutar para su estudio los ensayos de alteración acelerada a través de los ensayos de humedecimiento y secado, y cristalización de sales de sulfato de sodio.
- Correlacionar las propiedades petrográficas y petrofísicas con la alterabilidad.

3. ANTECEDENTES

3.1. Antecedentes a nivel mundial de propiedades petrofísicas.

A nivel mundial, se realizan estudios para evaluar propiedades petrofísicas y petrológicas, tanto para rocas ornamentales (areniscas, mármoles, gabros, granitos, entre otras) como para agregados para la construcción civil y la industria del petróleo y gas, dado que la orientación preferente de minerales, la dureza o la estructura cristalina pueden determinar la respuesta mecánica de la roca frente a fuerzas externas (Bell & Lindsay 1999, Tugrul & Zarif 1999, Hamad *et al.* 2001, González de Vallejo 2002, Chatterjee *et al.* 2005, Sousa 2014, Çelik *et al.* 2014).

Las propiedades físicas se determinan en el laboratorio a través de ensayos simples. Este trabajo toma los autores Goodman (1989) y Siegesmund & Snethlage (2010) como referencia para definir y comparar los valores de las propiedades petrofísicas obtenidas en este trabajo, con los valores que han obtenido dichos autores (tabla 1). El criterio de selección que se utilizó para estos autores fue que Goodman (1989) es reconocido y utilizado a nivel mundial como referencia, y el trabajo de Siegesmund & Snethlage (2010) se utilizó por su cercanía en el tiempo con este trabajo y que además estudia rocas de varios continentes como Asia, América del Sur (incluye rocas de Uruguay) y Europa.

Para Goodman (1989) la porosidad (n) es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la roca que se expresa porcentualmente. Este autor agrega que la porosidad de las rocas sedimentarias puede ir desde 0 a 90%, el valor promedio típico para las areniscas es de 15%. En este tipo de rocas el valor decrece con la edad y con la profundidad, en igualdad de condiciones de formación. Además, añade que algunas rocas volcánicas, por

ejemplo, pómez, también poseen alta porosidad, pero la comunicación entre los poros es baja y para el caso de las rocas ígneas y metamórficas la porosidad está relacionada mayormente con fisuras, un pequeño porcentaje de estas fisuras afectan a la roca al mismo grado que un gran porcentaje de poros sub-esféricos. En las rocas ígneas la porosidad es generalmente menor a 1-2% si no presentan meteorización, en caso afirmativo tiende a presentar un 20% o más de porosidad (Goodman 1989). Siegesmund & Snethlage (2010) afirman que todos los espacios huecos o cavidades se pueden clasificar bajo el término poro. Además, añaden que para la descripción del espacio poroso se desarrollaron diferentes esquemas de clasificación dependiendo principalmente de la aplicación. Dicha clasificación puede ser según: aspectos petrogenéticos (porosidad primaria y secundaria), geométricos (esféricos, cilíndricos, planares), genéticos (de grieta, de disolución y de contracción), de la capacidad de penetración de un fluido o gas, estos serán poros interconectados (poros de canal, de botella, telescopio), poros sin salida o poros aislados y por último la localización del poro en relación a las partículas sólidas: porosidad intrapartícula e interpartícula. Estos autores resaltan la importancia de la porosidad como uno de los parámetros más importantes en la roca, ya que tiene un efecto directo e indirecto sobre la mayoría de las propiedades físicas de las rocas.

La absorción de agua (w) es la relación entre el peso de la muestra saturada en agua y el peso de la muestra seca, se expresa porcentualmente. Siegesmund & Snethlage (2010) afirman que esta propiedad está influenciada principalmente por la porosidad, el tamaño y distribución de poros, y la composición mineral. La distribución y tamaño de poros tiene influencia sobre la absorción total de agua. En un período corto de inmersión se van a llenar primero los poros de mayor tamaño, mientras que los poros más pequeños lo harán en inmersiones más prolongadas (Siegesmund & Snethlage 2010).

La densidad (ρ) es la relación entre la masa y el volumen de la muestra, midiéndose en unidades de masa/unidades de volumen (ejemplo: kg/m³). Para Siegesmund & Snethlage (2010) esta propiedad se puede separar en densidad aparente (ρ) y densidad de matriz (ρ_{matriz}). El valor de la densidad aparente se expresa con respecto a la porosidad del material y la densidad de matriz solamente depende de los minerales que componen a la roca y no tiene en cuenta la porosidad (Siegesmund & Snethlage 2010).

La velocidad sónica es la velocidad de la propagación de ondas elásticas (ondas de compresión) a través de la muestra de roca. Según Goodman (1989) en teoría la velocidad con la que la onda se transmite a través de las rocas depende exclusivamente de sus propiedades elásticas y su densidad, pero en la práctica, una red de fisuras en la muestra superpone un efecto predominante, que permite estimar el grado de fisuración dentro de la muestra de roca. También depende del contenido de agua (grado de saturación) y del estado de conservación que presente la roca, por lo tanto, la velocidad de propagación de onda se utiliza generalmente como herramienta diagnóstico para la evaluación de rocas ornamentales (Goodman 1989, Siegesmund & Snethlage 2010).

Tabla 1. Recopilación de valores de algunas propiedades petrofísicas seleccionadas de Goodman (1989) y Siegesmund & Snethlage (2010).

Tipo de roca	n (%)	w (%)	ρ (kg/m ³)	ρ_{matriz} (kg/m ³)	Vel.Sónica (m/s)
Granito	0 - 1,1	0,2 - 0,4	2600 - 2670	2620 - 2670	5500-6000
Basalto	0,1 - 2	0,05 - 1,67	2800 - 2900	---	6500-7000
Riolita	0,6 - 10	0,3 - 4,8	2530 - 2570	2540 - 2640	---
Arenisca	0,7 – 34*	0,8 - 21	2030 – 2530*	2260 – 2730*	6000
Pizarra	0,1 – 1*	0,2 - 0,4	2790 – 2810*	2790 – 2810*	6000-6500

n: porosidad, w: absorción de agua, ρ : densidad aparente, ρ_{matriz} : densidad de matriz. *Dentro de estos valores se contemplan los valores de rocas del Uruguay según Siegesmund & Snethlage (2010).

3.1.2. Antecedentes a nivel mundial de ensayos de alteración.

Muchos investigadores cuando realizan ensayos de petrofísicos, también realizan ensayos sobre alteración, principalmente si la roca estudiada se utiliza para fachada de edificios, monumentos u obras civiles. En general, para rocas ornamentales se suelen realizar ensayos de alteración artificial, como cristalización de sales, ciclos alternantes de humedecimiento y secado, de hielo y deshielo, a luz ultravioleta y atmósferas contaminadas o nieblas salinas. Dichos ensayos suelen simular las condiciones naturales a las que se va a exponer la roca y de esta manera se cuantifica su durabilidad, o en el caso en que la roca ya se encuentra afectada, se realizan estos ensayos para diagnosticar las causas del deterioro, como para el planeamiento de las intervenciones de conservación (Esbert *et al.* 1991, Grossi & Esbert 1994, Benavente 2002, Rivas Brea *et al.* 2008).

El efecto de la cristalización de sales solubles en condiciones naturales en la roca no sólo depende del tipo de sal, sino también de las características de la roca (Grossi & Esbert 1994, Benavente 2002). La combinación de factores como el tamaño y distribución de poros en la roca condicionará la resistencia de esta a las presiones generadas por las sales durante los procesos de cristalización, hidratación y deshidratación (Grossi & Esbert 1994, Benavente 2002). El sulfato de sodio es la sal que más daño puede causarle a una roca, al ser una sal compleja por tener dos fases estables (mirabilita y thenardita) cuya estabilidad va a depender de la temperatura, la humedad relativa y la presión capilar que se produce dentro de la roca (Benavente 2002). Los dos fenómenos que se dan en la cristalización de las sales son: presión de cristalización y distribución espacial de los minerales en el interior de la roca, esto provoca que cuanto más pequeño sea el tamaño de los poros, mayor será la presión de cristalización producida (Benavente 2002). Para el caso del sulfato de sodio que cristaliza (mirabilita) hacia el interior de la roca

produciendo subflorescencia, esto influye fuertemente en el deterioro de la roca (Grossi & Esbert 1994, Benavente 2002).

3.2. Antecedentes de estudios petrofísicos en Uruguay.

Existen pocos antecedentes acerca de propiedades petrofísicas de rocas en el Uruguay, entre ellos se encuentra el catálogo de “Piedras ornamentales del Uruguay”, su objetivo es mejorar el conocimiento sobre rocas ornamentales del Uruguay e impulsar su introducción al mercado mundial. Este catálogo contiene treinta fichas de rocas ornamentales, algunas de ellas gabros, granitos, mármoles, limolitas, entre otras, a las cuales se le realizan ensayos de carga puntual, hielividad, coeficiente de imbibición, resistencia al roce, rozamiento de deslizamiento y peso por unidad de volumen (Comunità Economica Europea-Uruguay (sin fecha)).

También existe otro antecedente que es el proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, que se llevó a cabo en los países que lo contienen. Le realizaron ensayos de petrofísica (densidad de matriz, densidad aparente, porosidad, permeabilidad al gas) y estudios petrográficos (difractometría de rayos X, microscopia electrónica de barrido), a en tres formaciones geológicas del Uruguay (formaciones Tacuarembó, Buena Vista y Yaguarí). Este estudio petrofísico se realizó con el fin de aumentar el conocimiento acerca del recurso y proponer un marco técnico, legal e institucional para su gestión sustentable coordinada entre los países (Aguirre *et al.* 2008).

Otra investigación fue la desarrollada por Morales Demarco (2012), sobre rocas ornamentales del Uruguay, en la cual se realizan diversos estudios petrográficos, petrofísicos (densidad, porosidad, expansión térmica, desplazamiento de ondas de ultrasonido) y mecánicos (compresión uniaxial,

módulo de Young, resistencia a la tracción indirecta, resistencia al anclaje y hielo-deshielo), con el fin catalogar doleritas, granitoides, sienitoides y pizarras dolomíticas para su uso económico.

En la tabla 2 se recopilan los valores más relevantes para este trabajo, para luego comparar con los valores obtenidos durante la investigación. En ellos se observa que la mayoría de los valores se encuentran dentro de los rangos esperados si se los compara con la tabla 1, las únicas muestras en los que difieren sus valores de velocidades de sonido con los esperados son Granito Cerro Áspero y Basalto Arapey. El valor del basalto (según Morales Demarco, 2012) se puede deber a que no es una muestra fresca.

Tabla 2. Recopilación de datos de propiedades petrofísicas basado en Aguirre *et al.* (2008) y Morales Demarco (2012).

Tipo de roca	n (%)	w (%)	ρ (kg/m ³)	ρ_{matriz} (kg/m ³)	Vel.Sónica (m/s) ¹
Arenisca (Fm. Tacuarembó)	20-33*	---	1740-2030*	2770-2550*	---
Arenisca (Fm. Buena Vista)	27,6-32*	---	1850-1910*	2710-2630*	---
Arenisca arcillosa (Fm. Yaguari)	27,8	---	1940	2690	---
Granito Maldonado	0,48	0,17	2640	2640	5396
Granito Chamangá	0,27	0,07	2690	2690	5450
Granito Cuchilla del Perdido	0,31	0,09	2720	2730	5680
Granito Cerro Áspero	0,80	0,27	2650	2670	3910
Granito de Soca (Moskart)	0,58	0,19	2660	2670	5620
Basalto Arapey	0,98	0,28	2940	2960	5673
Piedra laja ocre	0,23	0,12	2820	2830	---
Piedra laja verde clara	0,10	0,05	2830	2830	---
Piedra laja negra, Rufo Hnos.	0,16	0,05	2800	2810	---

n: porosidad, w: absorción de agua, ρ : densidad aparente, ρ_{matriz} : densidad de matriz. ¹ Valores promedio de velocidad sónica de la muestra en seco. * Los valores se tomaron máximo y mínimo del total de las muestras ensayadas.

3.2.1. Antecedentes de ensayos de alteración en Uruguay.

Con respecto a estudios para evaluar la durabilidad de las rocas Goso *et al.* (1998a y b), realizaron ensayos para medir cuantitativamente esta propiedad en rocas basálticas del noroeste del Uruguay utilizadas en obras de

caminería. La durabilidad de esta roca, entendida como la fragmentación y/o arenización que puede sufrir la misma durante la vida útil de la obra, tendría lugar cuando el esfuerzo generado por la expansión debida al aumento del contenido del agua en las arcillas esmectíticas, supera la resistencia a la tracción del material basáltico (Goso *et al.* 1998a y b).

Para determinar esta propiedad dichos autores efectuaron ensayos aceleradores de la degradación: dimetil sulfóxido, etilén glicol, humedecimiento y secado, Los Angeles seco y Los Angeles húmedo. Los tres primeros son ensayos aceleradores físico-químicos, que basan su acción en el efecto expansivo del reactivo respectivo sobre las arcillas esmectíticas y los dos últimos son aceleradores físicos, que evalúan la susceptibilidad al desgaste (Goso *et al.* 1998a). Al comparar las pérdidas entre los ensayos físicos-químicos, los autores observan que el ensayo de humedecimiento y secado es el que menos pérdida le ocasiona a la roca y el que más pérdida le ocasiona, es el ensayo con dimetil sulfóxido, para el caso de ensayos físicos el que menos pérdida le ocasiona es el ensayo Los Angeles seco (Goso *et al.* 1998a).

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Materiales estudiados.

La estrategia de investigación consistió en seleccionar muestras de distintos tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) del Uruguay, con la finalidad de obtener una diversidad mineralógica, petrográfica y petrofísica, que permita evaluar sus diferencias y correlacionarlas según su génesis.

Se colectaron muestras en diferentes zonas de los departamentos de Canelones y Lavalleja (Fig. 1), donde existen canteras o afloramientos de fácil acceso para la extracción de las muestras.

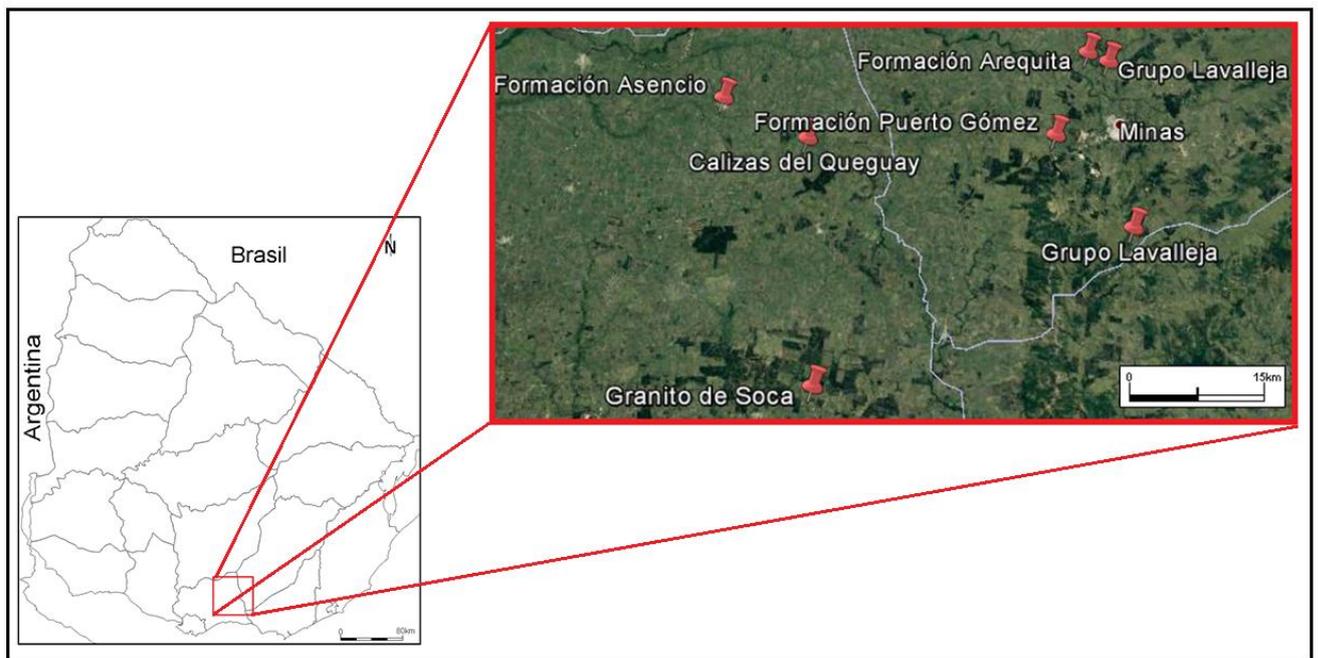


Fig.1. Mapa ilustrativo del Uruguay que representa los puntos donde se extrajeron las muestras.

4.1.2 Breve revisión bibliográfica de la geología de los materiales estudiados.

Se han seleccionado las siguientes unidades de rocas:

Rocas Ígneas

-Granito de Soca (coordenadas (UTM) X: 624615 m E - Y: 6162556 m S): Se localiza en el terreno Piedra Alta nombrado por Bossi *et al.* (1966) de edad paleoproterozoica, datado con rubidio-estroncio (Rb^{87}/Sr^{86}) en 1800 ± 150 Ma. (Umpierre & Halpern 1971). Según Oyhantçabal *et al.* (1998) este se trata de un leucogranito porfirítico con un área aflorante de 75 km², aproximadamente. Su petrografía es: dos generaciones de cuarzo, plagioclasas y feldespato alcalino; presencia de piroxenos ricos en hierro, micas y anfíboles asociados con relictos de fayalita. Como minerales accesorios son frecuentes zircón, allanita y apatito (Oyhantçabal *et al.* 1998). Esta roca se ha explotado durante décadas para utilizarla como roca ornamental, comercialmente se lo conoce como Moskart, Labrador Green y Emerald Green (Comunità Economica Europea-Uruguay (sin fecha), Morales Demarco 2012).

-Formación Puerto Gómez (coordenadas (UTM) X: 653905 m E-Y: 6192893 m S): definida como unidad formal y como lavas de edades mesozoicas por Bossi (1966), se denomina de esta manera al conjunto de derrames de composición basáltica (principalmente), localizados en todas las fosas tectónicas del sur y sureste del país (Muzio 2004). Son lavas de composición basáltica, con mineralogía constituida por clinopiroxeno (augita), plagioclasas cálcicas, olivino y minerales opacos. Las amígdalas presentan rellenos de minerales secundarios del grupo de las ceolitas, calcita, yeso y cuarzo (Bossi 1966, Muzio 2004).

No se encontró en la bibliografía referencia sobre explotación económica de esta roca.

-Formación Arequita (coordenadas (UTM) X: 658347 m E - Y: 6203672 m S): Definida como unidad formal por Bossi (1966) y edad mesozoica – cretácica, datado con potasio-argón (K^{40}/Ar^{40}) en 119,8 Ma. (Bossi 1966). Estas lavas son de composición ácida y se encuentran presentes en todas las fosas tectónicas mesozoicas del Sur y Sureste del país (con excepción de la Cuenca Punta del Este) (Muzio 2004). Esta roca suele presentar textura porfirítica con fenocristales de cuarzo, albita y/o sanidina frecuentemente corroídos, la matriz puede ser vítrea en la parte superior de los derrames (Bossi 1966, Muzio 2004).

Esta roca se explota para obtener “piedra partida” que se utiliza comúnmente como material de obras civiles (Medina Estefan 2014).

Rocas Sedimentarias

-Calizas del Queguay (coordenadas (UTM) X: 623633 m E - Y: 6192694 m S): Según Bossi (1966) estas rocas fueron descritas primeramente por Walther (1930) como “piedras córneas y calizas silíceas”, luego toma el nombre como calizas del Queguay por Serra (1945) (Bossi 1966). Para Goso (1999) esta unidad es producto de procesos de calcretización de las areniscas y conglomerados de la Formación Mercedes. Las Calizas del Queguay son de edades pleistocénicas y su litología característica trata de calizas blancas a blanquecinas, macizas, arenosas y brechosas, a las que se asocian niveles silíceos incoloros o de variados colores: blancos, rojos, hasta grises muy oscuros (Veroslavsky & de Santa Ana 2004). Este conjunto se dispone en bancos y lentes de potencias variables, alcanzan espesores próximos a los 20 metros. Otra característica distintiva de la unidad es la relación carbonato de calcio–sílice que posee (Veroslavsky & de Santa Ana 2004).

A partir de la década de 1970 esta roca se comenzó a explotar como materia prima para la elaboración de cemento portland (Veroslavsky & de Santa Ana 2004).

-Formación Asencio - Miembro del Palacio (Geosuelo del Palacio) (coordenadas (UTM) X: 613213 m E - Y: 6198041 m S): Denominado miembro del Palacio por Bossi (1966) y Geosuelo del Palacio por Goso (1999) de edad cretácico superior (Goso & Perea 2004), el cual añade que este miembro fue formado a expensas de los sedimentos arenosos de la Formación Mercedes (Goso 1999). Este autor lo describe como areniscas finas ferrificadas, a veces con preservación de las geometrías estratales (barras y pequeños canales). En algunos casos, esas corazas están sustentadas por estructuras columnares de diámetro métrico con diferentes alturas que no superan los 2,20 metros (Goso 1999, Goso & Perea 2004). No se encontró referencia bibliográfica para esta roca con fines económicos.

Rocas Metamórficas

-Grupo Lavalleja (coordenadas (UTM) X: 660828 m E - Y: 6202449 m S para las metacalizas y coordenadas (UTM) X: 662735 m E - Y: 6181161 m S para las pizarras): Preciozzi *et al.* (1985) separan a este Grupo, de edades precámbricas medio-superior, en dos unidades: una unidad integrada por una secuencia vulcano-sedimentaria, caracterizada por metamorfismo bajo y otra unidad caracterizada por el desarrollo de un metamorfismo medio (esquitos cuarzo feldespáticos y anfibólicos, leptinitas, micaesquitos, gneises y mármoles). Según estos autores la unidad metavulcano-sedimentaria (de cual se extrajeron los materiales estudiados en este trabajo) está integrada básicamente por: rocas metavolcánicas ácidas, rocas metavolcánicas básicas, bancos y lentes de calizas a veces muy extendidas (más o menos dolomítica), calcofilitas y filitas sericíticas (generalmente muy bien laminadas). Se asocian cuarzo filitas, cuarcitas (generalmente homogéneas de grano fino a medio) y cuarcitas microcristalinas, metasiltitos y metaareniscas. (Preciozzi *et al.* 1985). Las pizarras dolomíticas (calcofilitas) de la unidad vulcano-sedimentaria se explotan como roca ornamental, por ejemplo: revestimiento de fachadas y

pisos (Morales Demarco 2012), para la metacaliza no se encontró referencia bibliográfica para esta roca con fines económicos.

La figura 2 ilustra el mapa geológico representativo de los lugares donde se extrajeron las muestras. En la tabla 3 se ilustra los litotipos estudiados de cada unidad.

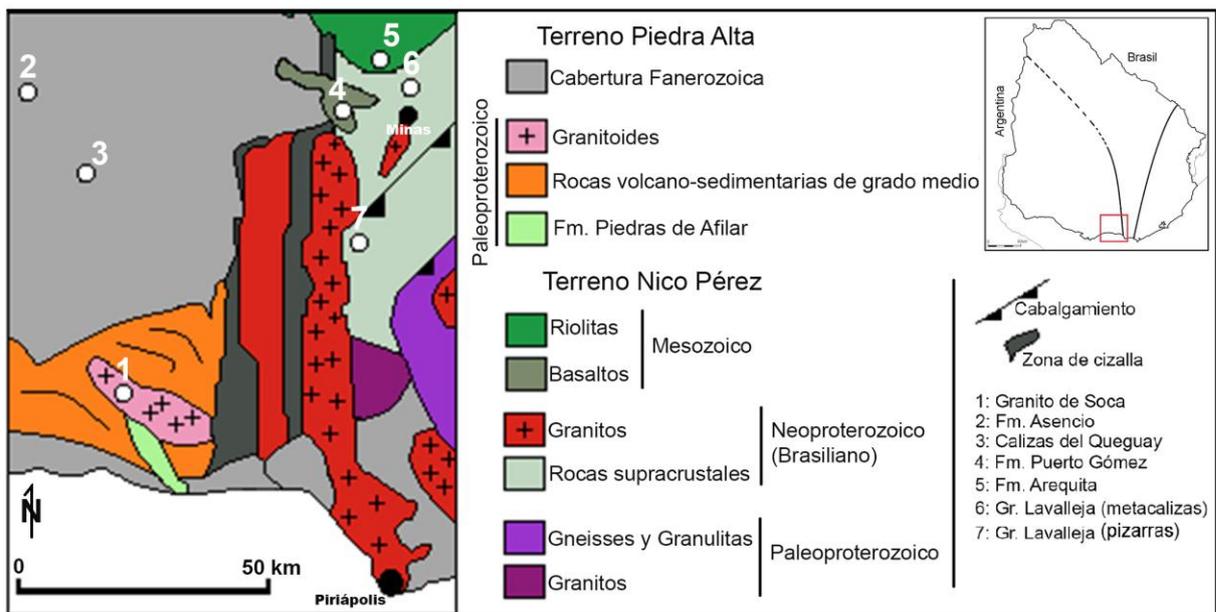


Fig.2. Mapa geológico esquemático del área de estudio modificado de Oyhançabal *et al.* 2011.

Tabla 3. Tipos de rocas de cada formación

Unidad	Tipo de Roca a utilizar
Granito de Soca	Granito
Formación Puerto Gómez	Basalto
Formación Arequita	Riolita
Calizas de Queguay	Caliza
Formación Asencio	Arenisca Ferrificada
Grupo Lavalleja	Metacaliza y Pizarra verde, Pizarra roja, Pizarra negra.

4.2. Metodología

A continuación, se procede a la descripción metodológica utilizada para cada ensayo. Los ensayos petrofísicos están basados en las recomendaciones de Ulusay & Hudson (2007), el ensayo de humedecimiento y secado se toma el procedimiento realizado por Goso *et al.* (1998a) y el tamaño, cantidad de muestra y temperatura del horno se basó en la norma I.N.V.E-220-07 colombiana en cual se basó todo el ensayo de cristalización de sales.

Cabe destacar que los ensayos están adecuados a la realidad de los laboratorios de geología del Uruguay, los cuales no cuentan con todo el equipamiento necesario.

4.2.1. Metodología de ensayos petrofísicos.

Preparación de muestras para ensayos petrofísicos.

Se decidió cortar cinco prismas, por el tipo de sierra que cuenta el laboratorio, de cada roca, para obtener promedio, de aproximadamente de 6x6x6 centímetros para que el diámetro del emisor y receptor del equipo de ultrasonido abarcara toda la superficie de la roca. Luego las muestras se lavaron para quitar algún residuo presente de aceite de la sierra y se secaron en horno a 50°C por 24 horas.

Métodos para la determinación de porosidad, densidad y absorción de agua (basado en Ulusay & Hudson 2007).

Se determina el peso en seco (W_d) de cada muestra en balanza de precisión. Se sumerge hasta el 50% de su volumen en agua destilada, se deja por 24 horas, después se completa con agua destilada hasta rebasar el 100% de las

muestras dejándolas 24 horas más. Al día siguiente se retiran del agua y se determina el peso saturado (W_{sat}) (Ulusay & Hudson 2007).

Posteriormente, se utiliza el principio de Arquímedes para determinar el volumen de las muestras ya que estas no son estrictamente regulares. Para ello se suspende a la muestra sujetándola de la base de la balanza, a través de una varilla que se encuentra sujeta la balanza de precisión, a su vez se sumerge en agua destilada a la muestra suspendida. Se toma el peso (W_{sab}), el cual será igual al empuje que recibe (Ulusay & Hudson 2007).

Después de obtener todos los datos se procede a realizar los cálculos para determinar:

$$\text{-Porosidad (n)} = \frac{(W_{sat} - W_d)}{V_t} \cdot 100 (\%)$$

$$\text{-Absorción de agua (w)} = \frac{W_w}{W_d} \cdot 100 (\%) = \frac{(W_{sat} - W_d) \cdot \rho_w}{W_d} \cdot 100 (\%)$$

$$\text{-Densidad de matriz } (\rho_{matriz}) = \rho_w \cdot \frac{(W_d)}{(W_d - W_{sab})}$$

$$\text{-Densidad aparente } (\rho) = \rho_w \cdot \frac{(W_d)}{(W_{sat} - W_{sab})}$$

Dónde: W_{sat} : Peso saturado de la muestra, W_d : Peso seco, W_w : Peso del agua, W_{sab} : Peso de la muestra sumergida en agua, V_t : Volumen total, ρ_w : Densidad del Agua.

Método para determinar la propagación de ondas sínicas (basado en Ulusay & Hudson 2007).

Se mide la distancia entre pares de caras paralelas con calibre. Luego se procede a medir el tiempo de propagación de onda dentro de la muestra con el equipo de ultrasonido Proceq / Pundit Lab que se encuentra en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR. Se coloca alcohol en gel en el emisor y receptor del equipo para que tenga mejor contacto con la roca y se toman tres medidas de cada cara. Se calcula el promedio de las medidas tomadas, para luego con las distancias entre caras, determinar la velocidad de propagación de la onda en la muestra (Ulusay *et al.* 2007).

4.2.2. Metodología de ensayos de alteración (cristalización de sales y humedecimiento y secado)

Preparación de muestras.

La preparación de muestra para ambos ensayos está basada en norma I.N.V.E-220-07, se decidió esto para contar con el mismo tamaño y cantidad de muestra en ambos ensayos.

Para cada ensayo se tritura cada tipo de roca utilizado hasta obtener 2,5 kilos de muestra con tamaños entre 37,5 mm y 9,5 mm aproximadamente, se tamiza el material obtenido en tamices con apertura entre 1 ½” a 3/8” (Tabla 4), donde se agrupan las granulometrías más grandes (37,5 mm a 19 mm) por un lado y las más pequeñas (19 mm a 9,5 mm) por otro, quedando dos grupos de muestra para ensayar. Posteriormente cada una, de estos grupos, se lava y se seca en horno a 50°C por 24 horas (I.N.V.E-220-07).

Tabla 4. Tamaño de muestra utilizada y cantidad por ensayo, basado en I.N.V.E -220-07.

Tamices mm (pulgadas)	Masa (g)	observaciones
37,5 a 25 (1 ½" a 1")	1000±50	Se agrupan quedando con 1500±50 g
25 a 19 (1" a ¾")	500±30	
19 a 12,5 (¾" a ½")	670±10	Se agrupan quedando con 1000±10 g
12,5 a 9,5 (½" a ⅜")	330±5	

Ensayo de Humedecimiento y secado (basado en Goso et al. (1998a) y norma I.N.V.E-220-07).

Se colocan las muestras separadas en bandejas como se detalla la Tabla 4, se le coloca agua destilada hasta sumergirlas totalmente por un periodo de 24 horas. Luego se llevan al horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ durante cuatro horas (I.N.V.E-220-07). Cada cinco ciclos se tamizan sobre los mismos tamices del comienzo y se pesan para cuantificar posibles pérdida (Goso et al. 1998a), esto se repite hasta alcanzar los 20 ciclos.

Ensayo de cristalización de sales (norma I.N.V.E-220-07).

Se prepara una solución saturada de sulfato de sodio, disolviendo 300 gramos de sulfato de sodio (Na_2SO_4) en un litro de agua destilada a 25°C y se deja reposar 48 horas antes de su empleo, la solución debe permanecer a temperatura constante entre 20° - 21°C (I.N.V.E-220-07).

Se colocan las muestras separadas por tamaño como se detalla en la Tabla 4, en mallas y luego se sumergen totalmente en la solución por un período no menor de 16 horas ni mayor a 18 horas. Pasado dicho período de tiempo se procede a secar las muestras en horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ durante cuatro horas. Este proceso de sumergir y secar se repite hasta alcanzar 20 ciclos. Alcanzado el último ciclo se deben lavar bien las muestras hasta eliminar todo el Na_2SO_4

con agua destilada a una temperatura de $43^{\circ} \pm 6^{\circ}\text{C}$. Para comprobar que las muestras no contengan más Na_2SO_4 se coloca unas gotas de solución de cloruro de bario 0,2 molar en el agua de lavado. Si al colocar estas gotas, en el agua de lavado, no queda turbia significa que las muestras están limpias (I.N.V.E-220-07).

Se vuelve a secar las muestras para luego tamizar en otros tamices (tabla 5) para cuantificar la pérdida. Por último, a las granulometrías mayores (37,5 mm a 19 mm o $1\frac{1}{2}''$ a $\frac{3}{4}''$) se le realiza un examen cualitativo, separando las partículas de cada muestra en grupos de acuerdo con el efecto que produce la acción del sulfato de sodio (fisurada, redondeada, etc.) y se registra el número de partículas que han sido afectadas (I.N.V.E-220-07).

Tabla 5. Tamices empleados para determinar pérdida en Na_2SO_4 .

Tamaño del agregado	Tamiz (en pulgadas) empleado para determinar la pérdida
37,5 a 19 ($1\frac{1}{2}''$ a $\frac{3}{4}''$)	$\frac{1}{2}''$
19 a 9,5 ($\frac{3}{4}''$ a $\frac{3}{8}''$)	$\frac{1}{4}''$

5. RESULTADOS

5.1. Descripción petrográfica.

A continuación, se describen las láminas delgadas obtenidas de las rocas estudiadas.

Granito de Soca

Esta roca posee textura fanerítica, holocristalina, inequigranular de cristales de tamaño entre >3 mm – 0,12 mm aproximadamente. Compuesta por minerales de feldespato alcalino (porcentaje de composición relativa: 45 - 50%) de cristales xenomorfos-subautomorfos de tamaño entre 3 mm a 1 mm aproximadamente, con macla simple, se observa en algunos cristales alteración a clorita y en otros se ven microfisuraciones, muchas rellenas con biotita. Cuarzos (porcentaje de composición relativa: 25 – 30%) de cristales xenomorfos, algunos presentan extinción ondulante y otros normal, muchos cristales se ven afectados por microfisuraciones rellenas de biotitas algunas de ellas. Plagioclasas (porcentaje de composición relativa: 5 – 8%) de cristales automorfos, composición An_{25-30} (oligoclasa), algunos cristales se encuentran alterados a sericita o clorita. Biotita (porcentaje de composición relativa: 6 – 8%) de cristales subautomorfos de color verdoso-pardo. Este mineral se encuentra en la roca y en relleno de microfisuras. Anfíbol (porcentaje de composición relativa: 5 – 8%) de cristales subautomorfos de color verde - marrón, muchos se encuentran alterados a clorita y también se observan algunos con inclusiones de apatito. Los minerales accesorios (porcentaje de composición relativa: 4 – 6%) que posee esta roca son zircón, apatito, epidoto y minerales opacos en menor proporción. Según el diagrama de Streckeisen (1976) por el porcentaje del contenido mineral esta roca se clasifica como granito álcali- feldespático.

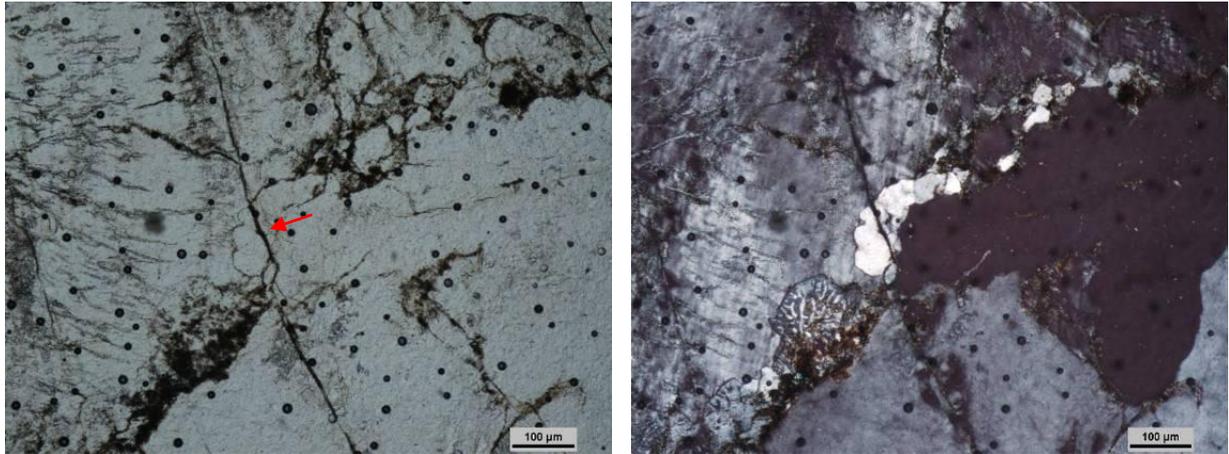


Fig.3. Fotomicrografías del Granito de Soca, en las cuales se observa minerales de feldespato alcalino, cuarzo, mirmequitas y biotita. Micrografía de la izq. luz polarizada plana, flecha roja que indica microfisuración. Dcha. Polarizadores cruzados.



Fig.4. Muestra de granito.

Formación Puerto Gómez

Roca con textura porfirítica - subofítica, afanítica, vacuolar e hipocristalina. Presenta minerales de olivino (porcentaje de composición relativa: 18 – 20%) como fenocristales y en la matriz de cristales xenomorfos, alterados a iddingsita. Plagioclasas (porcentaje de composición relativa: 40 – 45%) de cristales automorfos, como fenocristales y también en la matriz formando

entramado, de composición An_{52-57} (Labradorita). Piroxenos (porcentaje de composición relativa: 10 – 15%) subautomorfos de tamaño pequeño con extinción oblicua (clinopiroxeno), se encuentran dentro del entramado de las plagioclasas. Vidrio (porcentaje de composición relativa: 2 – 5%) de cristales xenomorfos, junto a minerales secundarios de óxidos de hierro en la matriz. Opacos (porcentaje de composición relativa: 2 – 5%) de cristales xenomorfos. Ceolita en amígdalas, la mayoría de las amígdalas (porcentaje de composición relativa: 6 – 10%) son esféricas a sub-esféricas, con tamaño >3 mm – 0,36 mm. Algunas contienen carbonato y ceolita o solo carbonatos. También se observa la presencia de vacuolas (porcentaje de composición relativa: 6 – 10%). Según el diagrama de Streckeisen (1976) por el porcentaje del contenido mineral esta roca se clasifica como basalto.

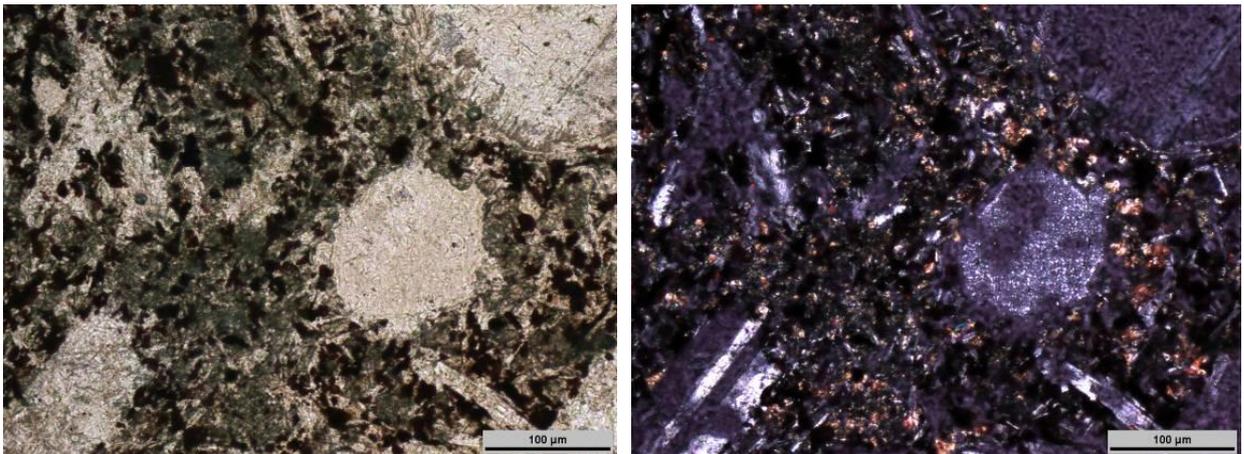


Fig.5. Fotomicrografías de basalto de formación Puerto Gómez, en ambas se observa minerales de plagioclasas (en fenocristales y matriz), piroxeno, amígdala con mineral de ceolita, opacos y óxidos de hierro. Micrografía de la izq. luz polarizada plana. Dcha. Polarizadores cruzados.



Fig.6. Muestra de basalto.

Formación Arequita

Esta roca presenta textura porfirítica de matriz criptocristalina y holocristalina. Presenta minerales de feldespato alcalino (porcentaje de composición relativa: 40 – 45%) como fenocristales algunos de los cuales se encuentran corroídos, cristales subautomorfos con macla simple. También en la matriz se observan cristales de feldespato. Cuarzo (porcentaje de composición relativa: 37 – 45%) de cristales xenomorfos como fenocristales y en la matriz. Plagioclasas (porcentaje de composición relativa: 10 – 15%) de cristales subautomorfos, composición An_{20-25} (oligoclasa), se encuentran en la matriz y de tamaño 7×10^{-3} mm aproximadamente y minerales accesorios (porcentaje de composición relativa: 3 – 5%) como epidoto, vidrio, óxido y opacos. Según el diagrama de Streckeisen (1976) por el porcentaje del contenido mineral esta roca se clasifica como riolita.

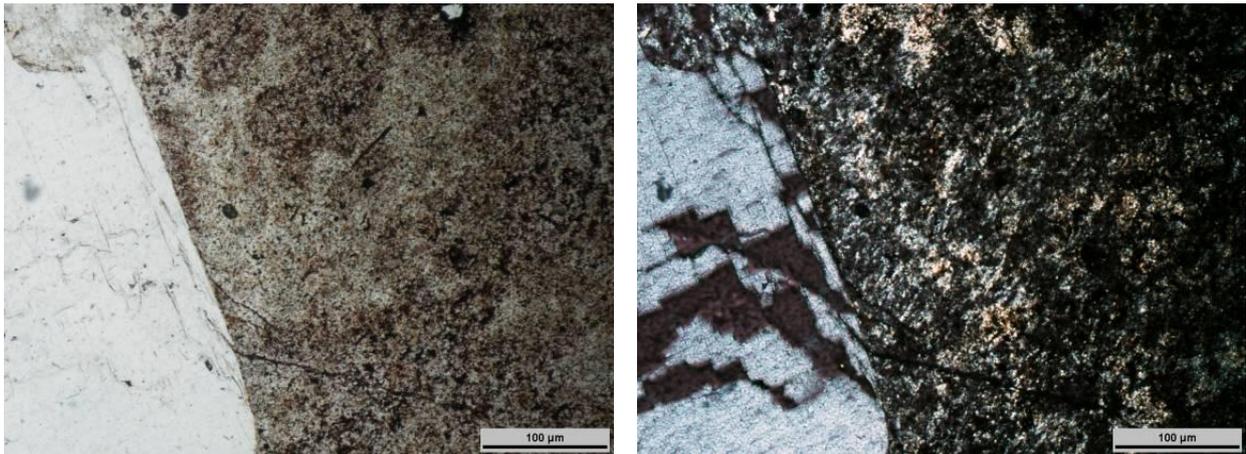


Fig.7. Fotomicrografías de riolita de formación Arequita, en ambas se observa minerales de feldespato alcalino (fenocristal) y la matriz muy fina con minerales de plagioclasas, cuarzo y opacos. Micrografía de la izq. luz polarizada plana. Dcha. Polarizadores cruzados.



Fig.8. Muestra de riolita.

Grupo Lavalleja; muestra de metacaliza

Roca de textura granoblástica equigranular poligonal que presenta minerales de carbonatos (porcentaje de composición relativa: 70 – 85%) de cristales pequeños subautomorfos, color de interferencia muy alto y extinción oblicua, por tinción con rojo de alizarina se determinó que este carbonato es calcita.

Cuarzos (porcentaje de composición relativa: 20 – 25%) detríticos subredondeados, cristales xenomorfos, algunos de ellos con extinción ondulante y otros con extinción recta, se encuentran agrupados en zonas, muchos presentando uniones triples, o dispersos en la roca. Según el British Geological Survey Robertson (1999) sugiere que a las rocas que se reconoce el protolito se le coloque el prefijo meta. Por lo tanto, esta roca es una metacaliza.

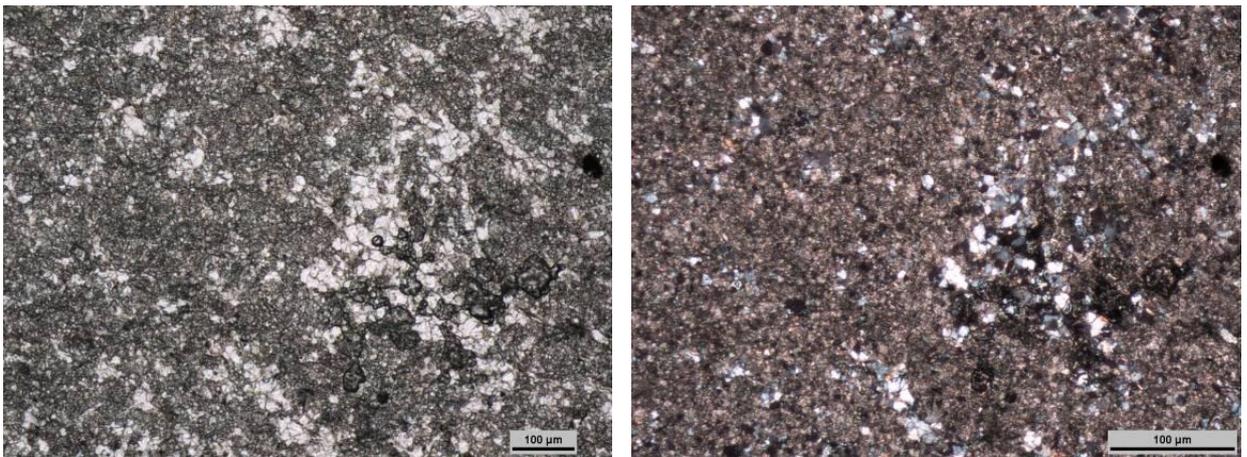


Fig.9. Fotomicrografías de metacaliza del Grupo Lavalleja, en ambas se observa minerales de carbonatos y cuarzos. En micrografía de la izq. luz polarizada plana. Dcha. Polarizadores cruzados.

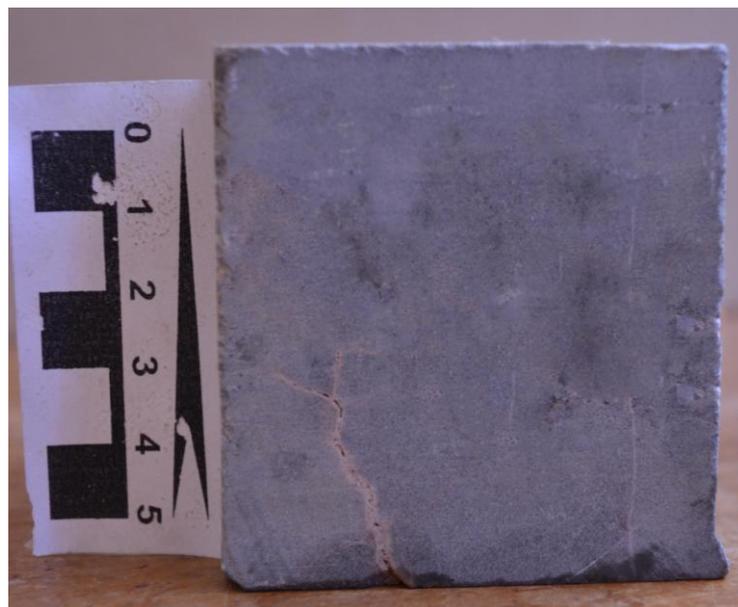


Fig.10. Muestra de metacaliza.

Grupo Lavalleja; muestra de pizarra roja

Esta roca posee una textura lepidoblástica, tamaño de grano entre 0,2 mm – 0,09 mm aproximadamente, levemente foliada. Compuesta por minerales de cuarzos (porcentaje de composición relativa: 20 – 25%) de cristales xenomorfos levemente estirados con extinción ondulante. Moscovita-sericita (porcentaje de composición relativa: 35 – 37%) de hábito tabular, incoloro con pleocroísmo leve, estirados, formando bandas. Carbonatos (porcentaje de composición relativa: 25 – 30%) de cristales xenomorfos levemente estirados, de composición dolomítica según Morales Demarco (2012). Feldespatos (porcentaje de composición relativa: 8 – 15%) de cristales xenomorfo-subautomorfo con macla simple y extinción recta, y opacos (porcentaje de composición relativa: 2 – 3%) de cristales xenomorfos de tamaño 0,1 mm – 0,02 mm aproximadamente. Basado en British Geological Survey (Robertson, 1999) para rocas de protolito sedimentario, según el contenido de cuarzo, feldespato, mica y carbonato, el grado de deformación y la descripción de Morales Demarco (2012) para la roca denominada “piedra laja ocre”, esta se clasifica como semipelita dolomítica pizarrosa.

Para simplificar en este trabajo a esta roca se le llama pizarra roja.

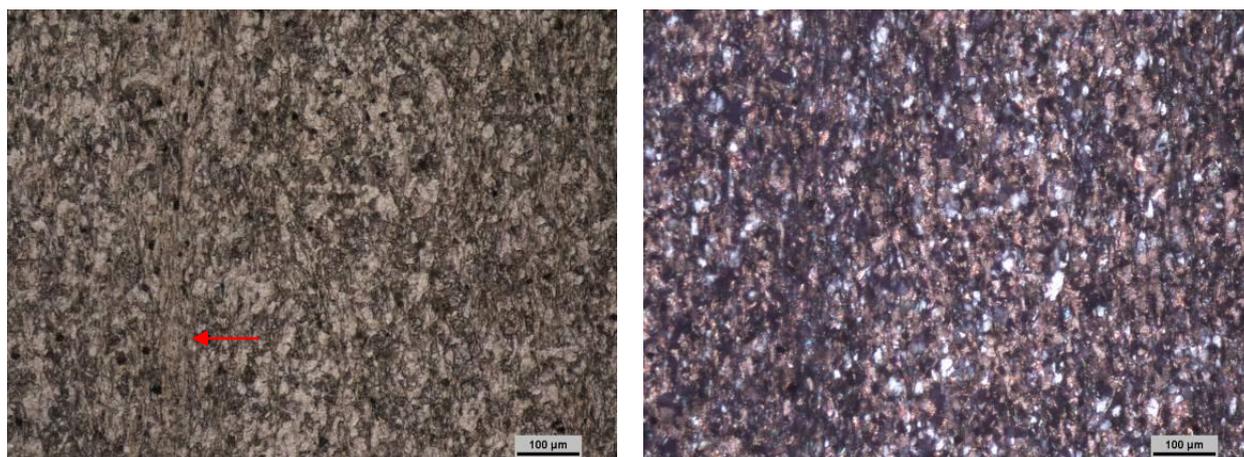


Fig.11. Fotomicrografías de pizarra roja del Grupo Lavalleja, se observa la foliación paralela en sentido vertical de la imagen, se distingue más claro en los minerales de moscovita – sericita (flecha roja) en la micrografía de la izq. de luz polarizada plana. Micrografía de la dcha. Polarizadores cruzados.

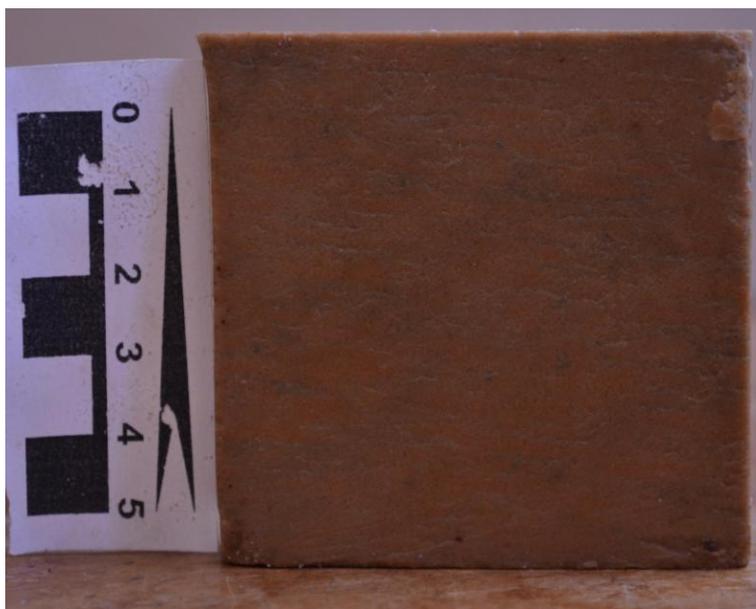


Fig.12. Muestra de pizarra roja.

Grupo Lavalleja; muestra de pizarra verde

Se trata de una roca de textura lepidoblástica de tamaño entre 0,6 mm – 0,2 mm aproximadamente, foliada. Presenta minerales de cuarzo (porcentaje de composición relativa: 20 – 25%) de cristales xenomorfos, estirados, extinción ondulante, en algunas zonas se observa cuarzo con uniones triples. Moscovita-sericita (porcentaje de composición relativa: 25 – 35%) de hábito tabular e incoloro con pleocroísmo leve y estirados formando bandas. Carbonatos (porcentaje de composición relativa: 27 -30%) de cristales xenomorfos, estirados, en algunos se observa exfoliación rómbica, de composición dolomítica según Morales Demarco (2012). Feldespatos (porcentaje de composición relativa: 18 – 20%) de cristales xenomorfo-subautomorfo también se encuentran estirados con macla simple y extinción recta. Basado en British Geological Survey (Robertson, 1999) para rocas de protolito sedimentario, según el contenido de cuarzo, feldespato, mica y carbonato, el grado de deformación y la descripción de Morales Demarco

(2012) para la roca denominada “piedra laja verde clara”, esta se clasifica como semipelita dolomítica pizarrosa.

Para simplificar en este trabajo a esta roca se le llama pizarra verde.

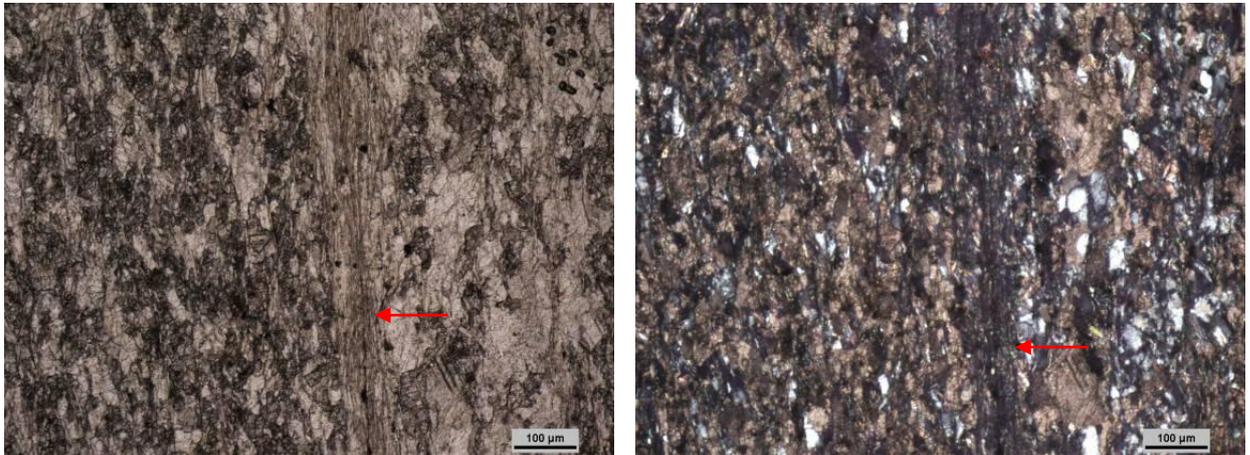


Fig.13. Fotomicrografías pizarra verde del Grupo Lavallega, se observa a la izq. con luz polarizada plana la foliación paralela en sentido vertical de la imagen, se distingue más claro en los minerales de moscovita – sericita (flecha roja). Dcha. Polarizadores cruzados (flecha roja indica misma foliación que en la imagen izquierda).

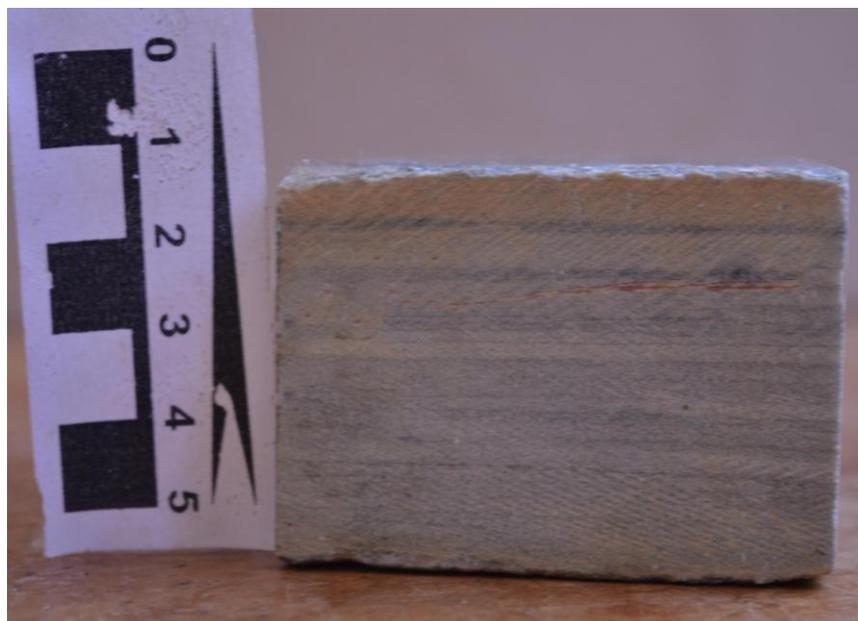


Fig.14. Muestra de Pizarra verde.

Grupo Lavallega; muestra de pizarra negra

Roca de textura granolepidoblástica con intercalaciones de bandas paralelas de carbonatos como matriz de tamaño entre 3 mm – 0,9 mm de ancho y de moscovita-sericita también como matriz de tamaño entre >3 mm – 0,8 mm de ancho. Compuesta por minerales de cuarzo (porcentaje de composición relativa: 20 – 25%) de cristales xenomorfos, redondeados y extinción ondulante. Moscovita – sericita (porcentaje de composición relativa: 35 – 40%) de hábito tabular e incoloro, en bandas como matriz. Carbonatos (porcentaje de composición relativa: 25 – 30%) de cristales xenomorfos, en bandas como matriz, de composición dolomítica según Morales Demarco (2012). Feldespatos (porcentaje de composición relativa: 8 – 10%) de cristales subautomorfos de tamaño 0,1 mm – 0,07 mm y opacos (porcentaje de composición relativa: 2 – 5%) que se asume pirita por el hábito prismático y constatación en muestra de mano. Basado en British Geological Survey (Robertson, 1999) para rocas de protolito sedimentario, según el contenido de cuarzo, feldespato, mica y carbonato, el grado de deformación y la descripción de Morales Demarco (2012) para la roca denominada “piedra laja negra, Rufo Hnos.”, esta se clasifica como semipelita dolomítica pizarrosa.

A esta roca en este trabajo se la llama Pizarra negra.

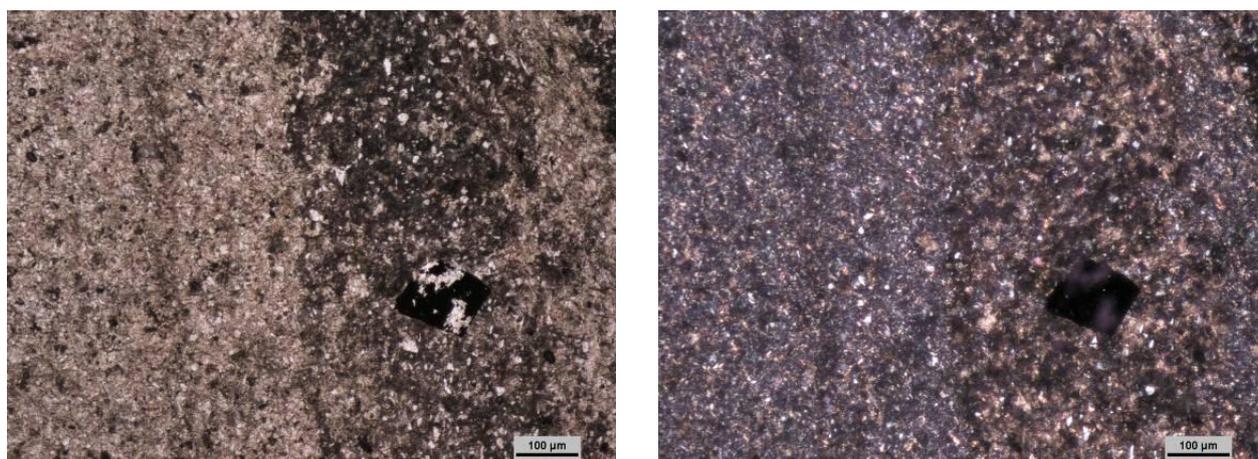


Fig.15. Fotomicrografías de pizarra negra del Grupo Lavallega, se observa en ambas imágenes las bandas bien marcadas y un cristal de hábito prismático que corresponde el mineral pirita. Izq. luz polarizada plana. Dcha. Polarizadores cruzados.

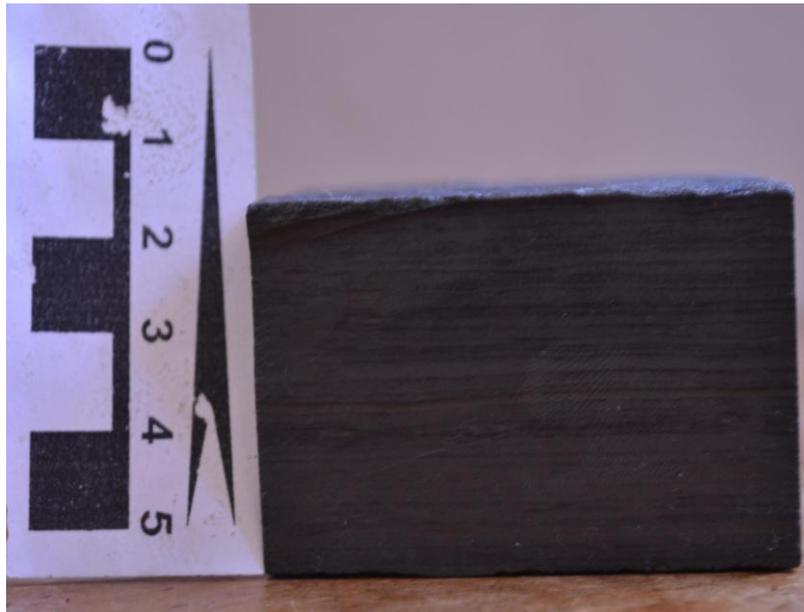


Fig.16. Muestra de pizarra negra.

Calizas del Queguay

Se trata de una roca sedimentaria de textura peloidal, que está compuesta por minerales carbonáticos (porcentaje de composición relativa: 50 – 55%), por tinción con rojo de alizarina se determinó que este carbonato es calcita, que se presentan en el esqueleto de la muestra en forma de clastos redondeados a sub-redondeados con fragmentos de cuarzo y calcedonia en su interior. También presenta minerales de cuarzo (porcentaje de composición relativa: 13 – 20%) detrítico de tamaño entre 1,6 mm - 0,2 mm redondeados a subredondeados. Muy bajo porcentaje de feldespato (porcentaje de composición relativa: 2 – 5%) el cual se presenta en granos subredondeados de tamaño pequeño de 0,4mm a 0,2mm aproximadamente. El cemento de esta roca es calcedonia (porcentaje de composición relativa: 25 – 30%). Por el contenido mineral, textura y cotejado con la bibliografía de Tófalo & Pazos (2010) esta roca se trata de una caliza.

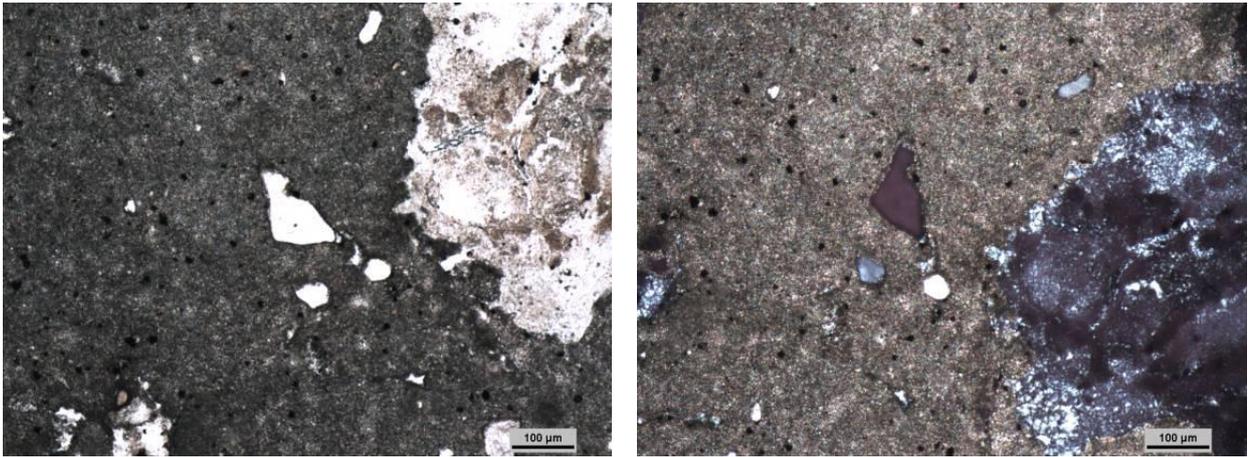


Fig.17. Fotomicrografías de Caliza de Calizas del Queguay, se observa Izq. luz polarizada plana. Dcha. Polarizadores cruzados.

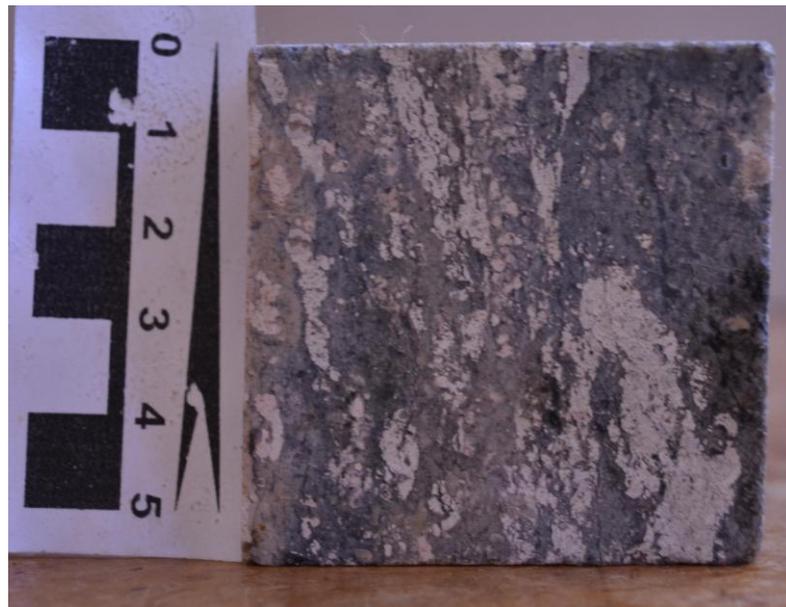


Fig.18. Muestra de Caliza.

Formación Asencio – Miembro del Palacio

Esta roca por ser friable se ha descrito en muestra de mano ya que no se contaba con los implementos para hacer lámina.

Roca de color rojizo con lentes blanquecinos, friable. Presenta granos redondeados a subredondeados de buena selección, ya que está compuesta mayoritariamente por cuarzo, también se identifican algunos fragmentos de feldespatos, pero muy pequeños. Se observa cemento de color rojizo, que posiblemente corresponda a óxido de hierro y presencia de bioturbaciones. Según el diagrama de Dott (1964) esta roca es una cuarzo arenita.



Fig.19. Foto de muestra de arenisca.

5.2. Resultados y análisis de los ensayos

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos petrofísicos y de alteración.

5.2.1. Resultados y análisis de ensayos petrofísicos.

Porosidad

Los valores de porosidad más altos los presentan la arenisca con 18,7% de porosidad promedio (tabla 6 y Fig. 20a) y el basalto con 10,8%. El valor de arenisca está dentro de lo esperado, si lo comparamos con los valores de la tabla 1 (ver página 6), pero el de basalto es superior ya que por lo general en la bibliografía los basaltos analizados son masivos y el basalto que se analiza en este trabajo es vacuolar, por lo tanto, es esperable que la porosidad sea mayor.

Los valores medios los presentan la caliza y riolita con 4% y 3%, respectivamente, los valores de la riolita se encuentran dentro del rango de valores presentado en la tabla 1. Por último, se encuentran el resto de las muestras de roca que poseen porosidades bajas que rondan el 0,03 al 1%. Dentro de estos valores se encuentra el granito que presenta una porosidad promedio de 0,51%. Este último valor es similar al presentado en la tabla 2 (ver página 9) para el mismo tipo de granito. Las pizarras roja y verde son las que presentan las porosidades promedio más bajas de 0,03% y 0,12% respectivamente, el valor de la pizarra verde coincide con el valor de “piedra laja verde” descrita en la tabla 2.

Tabla 6. Valores promedio de cada muestra, obtenidos en los ensayos petrofísicos.

Muestra	n (%)	w (%)	ρ (Kg/m ³)	ρ_{matriz} (Kg/m ³)
Granito	0,51 ± 0,45	0,19 ± 0,16	2677 ± 17	2691 ± 21
Basalto	10,8 ± 1,27	3,86 ± 0,42	2527 ± 29	2800 ± 37
Riolita	2,91 ± 1,17	1,12 ± 0,43	2500 ± 19	2573 ± 46
Metacaliza	0,96 ± 0,46	0,34 ± 0,16	2765 ± 22	2792 ± 11
Pizarra roja	0,03 ± 0,04	0,01 ± 0,01	2827 ± 3	2828 ± 3
Pizarra verde	0,12 ± 0,05	0,04 ± 0,02	2815 ± 2	2818 ± 3
Pizarra negra	0,40 ± 0,09	0,14 ± 0,03	2730 ± 34	2741 ± 34
Caliza	3,96 ± 1,07	1,60 ± 0,42	2377 ± 33	2471 ± 34
Arenisca	18,7 ± 0,95	7,73 ± 0,41	2039 ± 21	2420 ± 7

n: porosidad, w: absorción de agua, ρ : densidad aparente, ρ_{matriz} : densidad de matriz

Absorción de agua

Esta propiedad, como se dijo en los antecedentes, está vinculada a la porosidad y al contenido mineral. Si se comparan los gráficos de caja (boxplots) de porosidad, absorción de agua y densidad (Fig. 20 a, b y d) se observa que las rocas que presentan mayor porosidad son las que presentan mayor absorción de agua, pero menor densidad aparente, como por ejemplo la arenisca, que posee una porosidad promedio de 19%, una absorción de agua promedio de 8% y una densidad aparente de 2039 kg/m³. Lo inverso sucede con las rocas de baja porosidad como la pizarra roja, que su porosidad promedio es de 0,03%, absorción de agua promedio es 0,01% y una densidad aparente de 2827 kg/m³.

Densidad

Se observa que las rocas más densas, en promedio, (tabla 6) son las rocas ígneas y metamórficas, siendo las rocas sedimentarias las menos densas.

Dentro de las ígneas el basalto presenta mayor densidad de matriz (Fig. 20c) que el granito y este es más denso que la riolita, esto se debe a que el basalto está compuesto por minerales máficos, el granito y la riolita están compuestos

principalmente por minerales félsicos que son menos densos que los máficos. El granito es más denso que la riolita porque posee anfíbol y biotita que son minerales máficos. Sin embargo, cuando se compara la densidad aparente (Fig. 20d) se observa que, el basalto tiene una densidad aparente más baja que en la densidad de matriz, y que la riolita y el granito no presentan mayor diferencia con la densidad de matriz, esto se debe a que el basalto presenta mayor porosidad que el granito y la riolita.

En el caso de las rocas metamórficas si se compara ambas densidades se observa que no difieren entre sí, debido a que presentan porosidades muy bajas. Caso contrario es el de las rocas sedimentarias, en las cuales se distingue la diferencia de densidades por la alta porosidad que presentan, particularmente en el caso de la arenisca con densidad de matriz de 2420 kg/m³ promedio y una densidad aparente 2039 kg/m³.

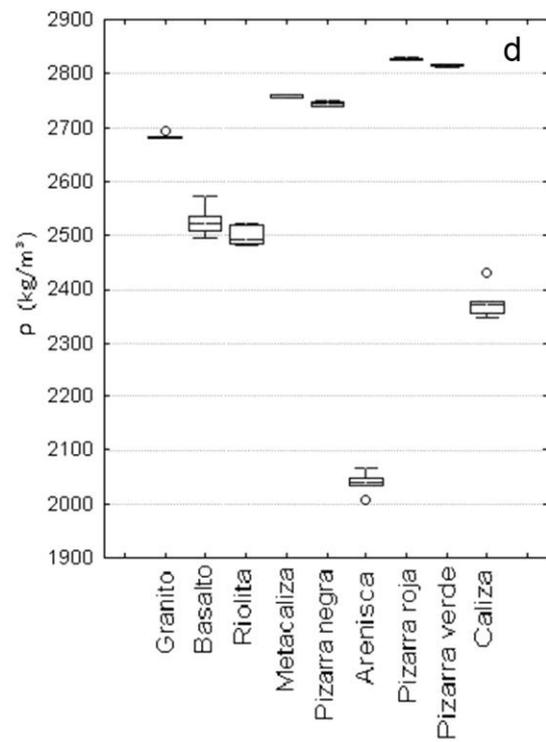
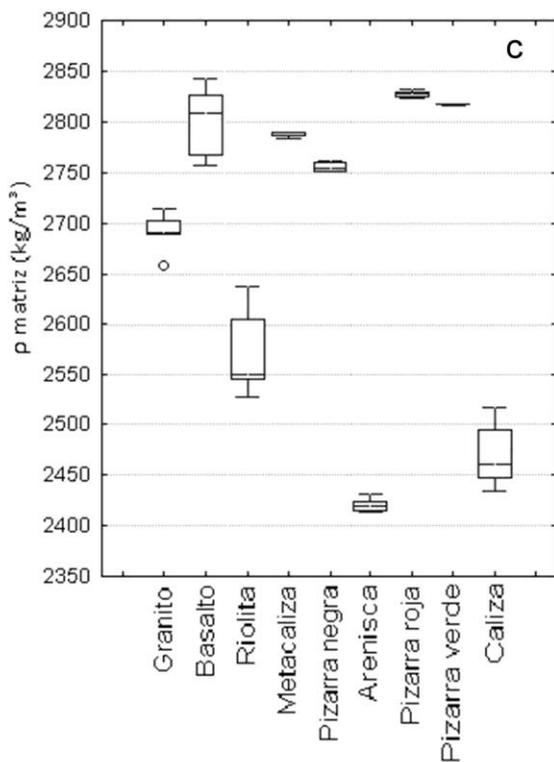
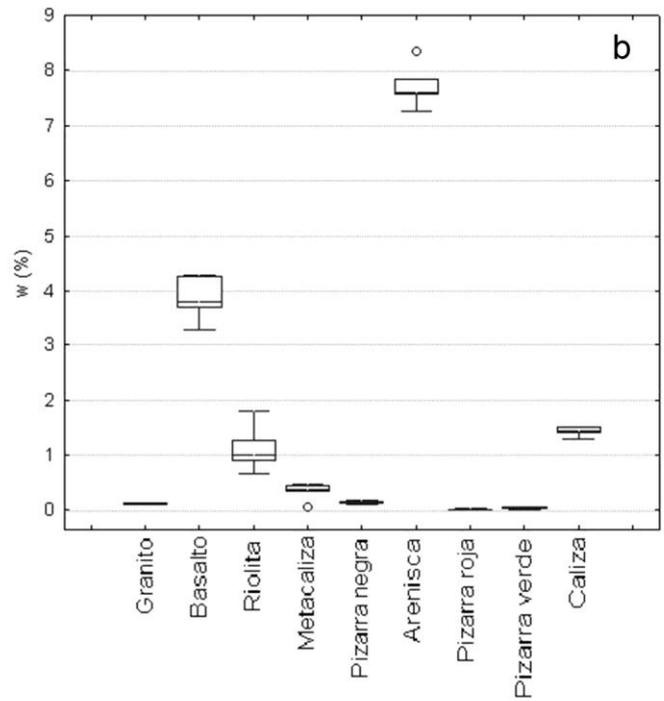
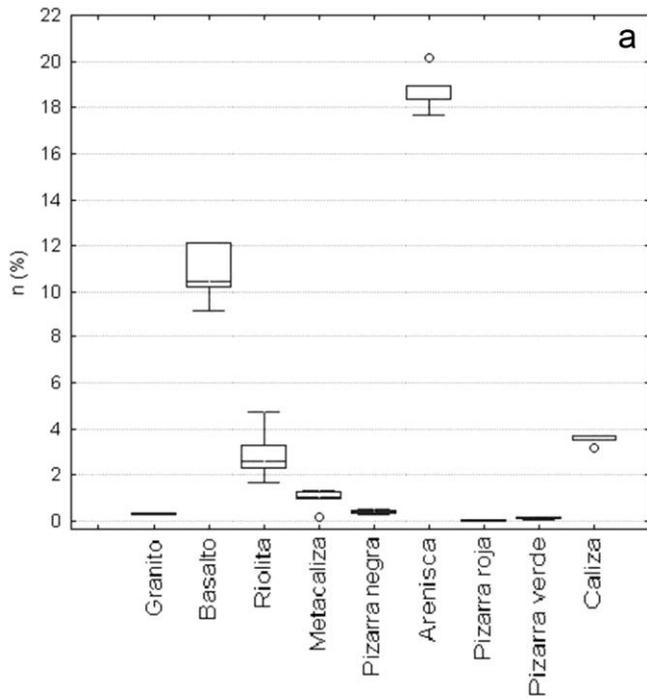


Fig.20. Graficos de caja (bpxplots) de a: Porosidad (n), b: Absorción de agua (w), c: Densidad de matriz (ρ_{matriz}) y d: Densidad Apparente (ρ). — Mediana, \square 25%-75%, \perp Non-Outlier Range, \circ Valores atípicos (todos los valores en anexo, Tabla I).

Velocidad de propagación de onda

En la figura 21 se observa el gráfico de velocidad de propagación de onda, en el que se ilustra la velocidad de la onda cuando la muestra se encuentra en seco y cuando está saturada en agua. También se observa cómo varía la velocidad en rocas con foliación marcada.

Para rocas que presentan foliación marcada, como es el caso de las pizarras, se decidió diferenciar la onda que atraviesa perpendicularmente a la foliación de la que lo atraviesa paralela. Al comparar estos valores se observa que cuando la onda atraviesa perpendicularmente a la foliación es más lenta que cuando lo hace paralela a la foliación. A su vez si se compara la velocidad de propagación de onda de este plano cuando la roca está saturada de cuando no, se observa que la velocidad es aproximadamente igual.

En rasgos generales se observa que la velocidad de onda presenta mayor velocidad cuando la roca se encuentra saturada que cuando no lo está.

Como se explicó en los antecedentes, las propiedades petrofísicas que influyen en la propagación de las ondas son la densidad y la porosidad. En la figura 22 (a) se compara la velocidad de propagación con la densidad, es clara una tendencia de que, cuanto más densa la muestra mayor es la velocidad de onda, tanto si está saturada la muestra o si no lo está. En el caso de la porosidad (Fig. 22b) la tendencia es inversa, cuanto menos porosa es la roca, mayor es la velocidad de propagación.

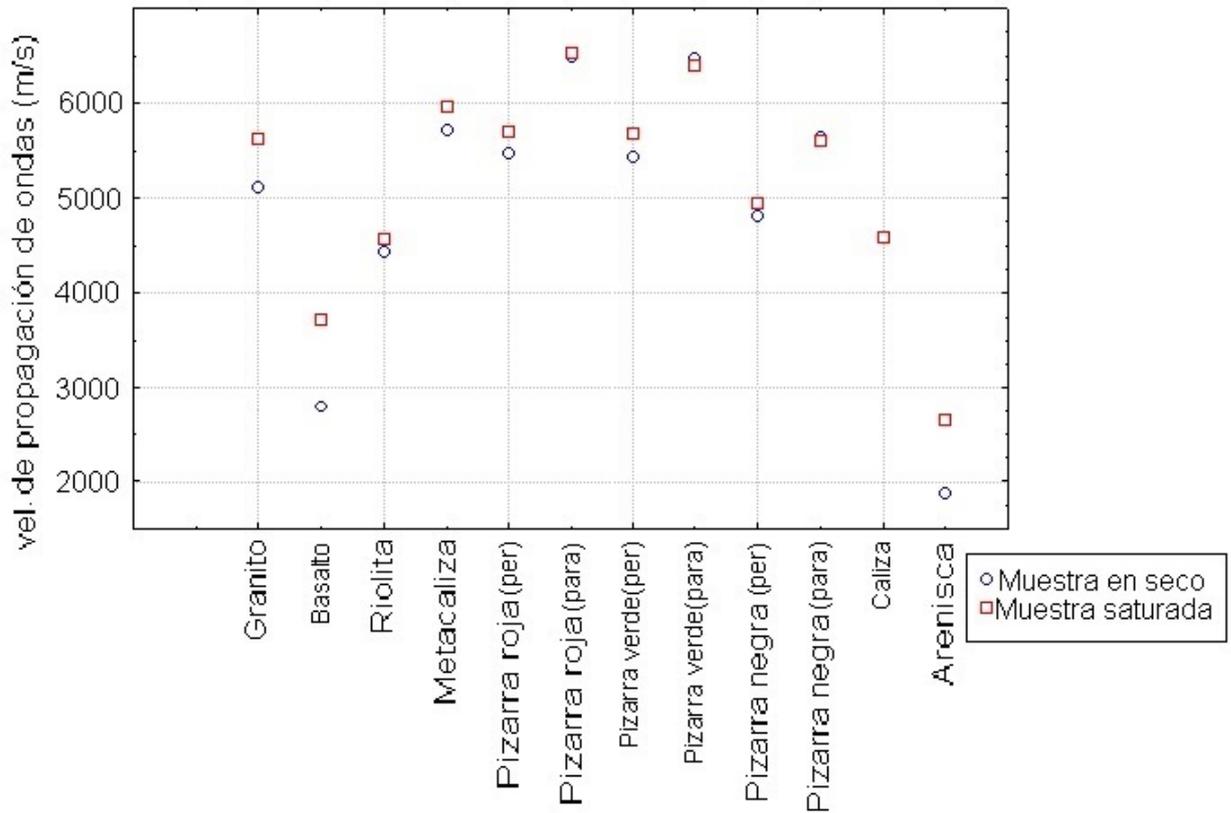


Fig.21. Gráfico de velocidad de propagación de onda de muestras saturas y en seco. Se diferencia la orientación en la que se tomó la medida para las pizarras, per: perpendicular a la foliación y para: paralelo a la foliación (valores en anexo, Tabla I).

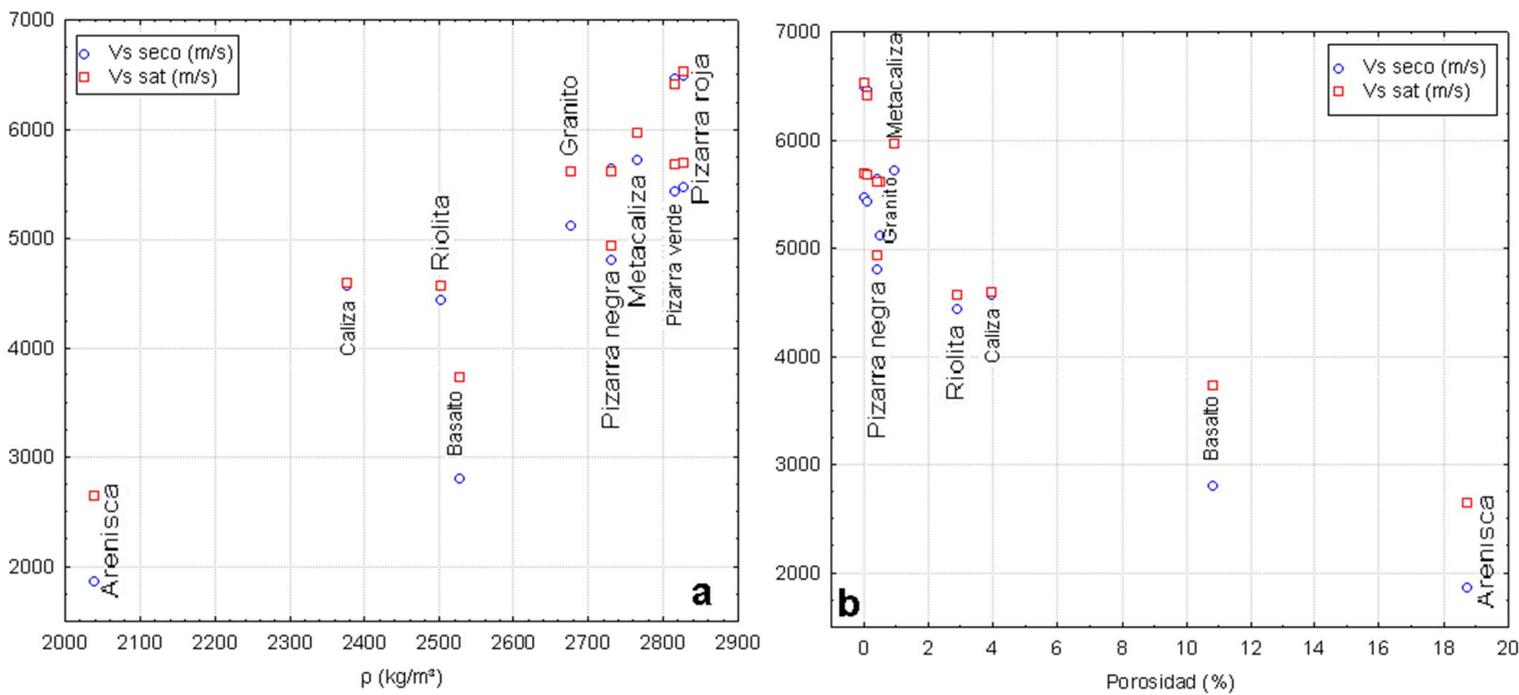


Fig.22. a: gráfico densidad aparente vs velocidad de propagación de onda. b: gráfico de porosidad vs velocidad de propagación de onda (puntos que aparecen sin nombre pertenecen a las pizarras rojas y verdes).

Observaciones: Luego de saturar las muestras se observó que algunas de las muestra de calizas se desagregaron (Fig. 23) y que dos de las muestras de pizarra negra se fracturaron por uno o más de sus planos de debilidad. Estos planos son los compuestos por sericita y minerales de pirita, los cuales son las capas de micas (Fig. 24).

Al observar esto se decidió que para el ensayo de alteración las muestras de caliza no se iban a tomar en cuenta por su pérdida temprana de material y que tampoco se iban a ensayar las muestras de arenisca, ya que por sus características de friable y muy porosa no iban a soportar los ensayos.



Fig.23. a. Muestra antes de saturar. b. Después de saturar

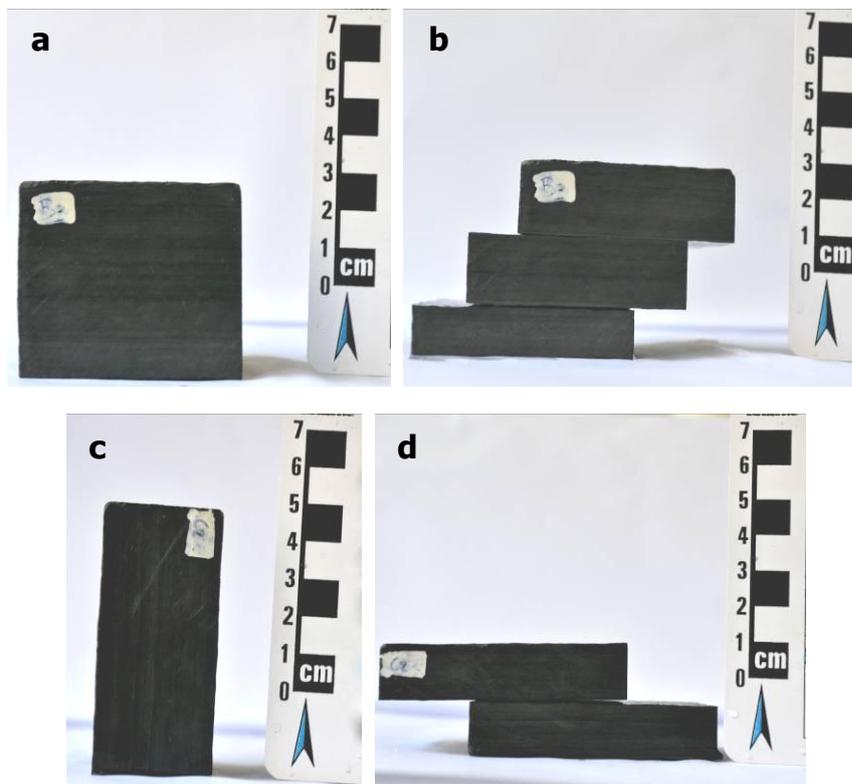


Fig.24. a y c : Muestras antes de saturar. b y c: muestras Después de saturar

5.2.2. Resultados y analisis de ensayos de alteración.

Se presentan a continuación los gráficos de los resultados obtenidos en los ensayos alteración luego de veinte ciclos.

Ensayo de humedecimiento y secado (HyS).

En la figura 25 se muestra los resultados obtenidos, los cuales se determinaron por la pérdida de material cada cinco ciclos. La mayor pérdida que experimentan la mayoría de las muestras se da en el quinto ciclo, también se observa que las granulometrías menores (19 mm a 9,5 mm o 3/4" a 3/8") experimentan más pérdidas que en las granulometrías mayores (37,5 mm a 19 mm o 1 1/2" a 3/4"), esto se puede deber a que los materiales más chicos poseen mayor superficie que los más grandes y por eso son más fáciles de alterar.

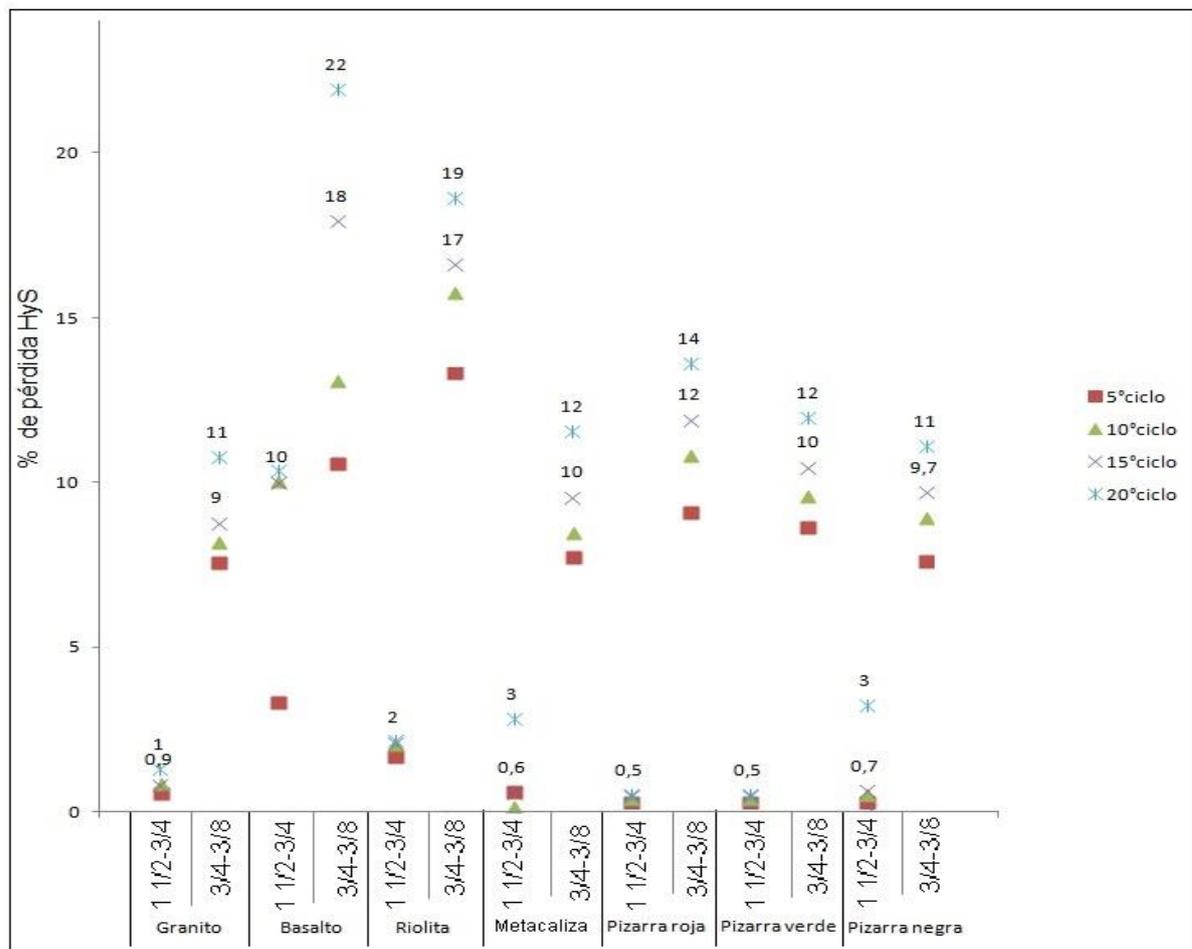


Fig.25. Gráfico de porcentaje de pérdida, separado por tamaño en los distintos ciclos (valores en anexo, Tabla II). Donde 1 1/2" a 3/4" = 37,5 mm a 19 mm y 3/4" a 3/8" = 19 mm a 9,5 mm.

Si se comparan los ciclos con la pérdida de cada muestra, se observa que existen muestras en las cuales su pérdida acumulada es estable, a largo de los ciclos, y otras que su pérdida acumulada va en ascenso en el correr de los ciclos. Al observar la figura 26 se puede establecer que existe una tendencia en las muestras que no alcanzan el 2% de pérdida en el quinto ciclo a no desarrollar pérdidas mayores en los ciclos sucesivos, ya que en general, la pérdida que se da en los otros ciclos es menor al 1%. Algo similar sucede en general con las muestras que no alcanzan el 10% de pérdida en el quinto ciclo, en ellas se observa que su pérdida es gradual y no mayor al 3% aproximadamente. Para el caso de las muestras con pérdidas mayores al 10%, en el quinto ciclo, su pérdida continuó en ascenso, con pérdidas mayores al 5% en los ciclos restantes.

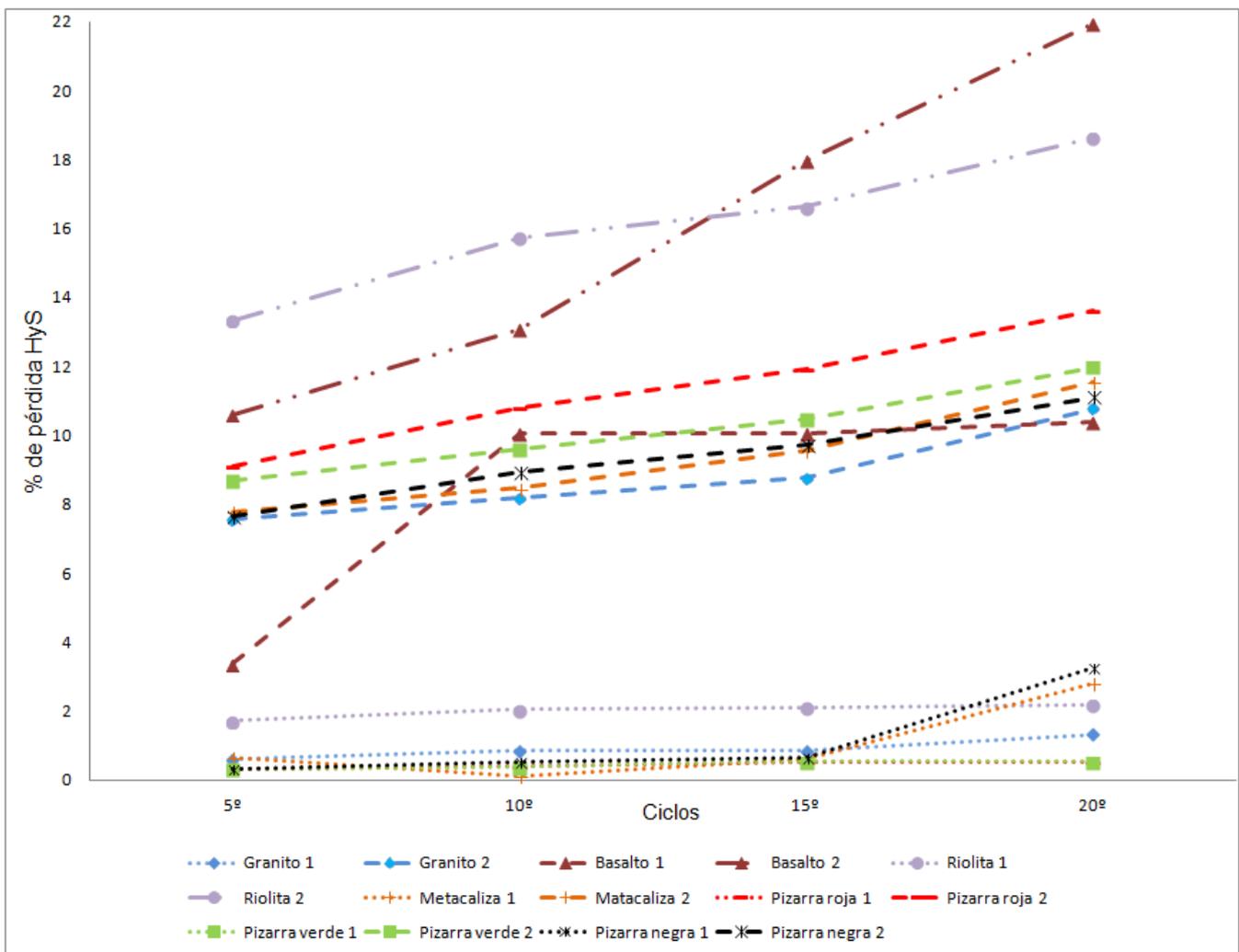


Fig.26. Gráfico de porcentaje de pérdida HyS vs ciclos. Las muestras con el número 1 son las de granulometrías mayores (37,5 mm a 19 mm) y las con el número 2 son las de granulometrías menores (19 mm a 9,5 mm).

Ensayo de cristalización de sal sulfato de sodio (Na_2SO_4).

En la figura 27 se aprecia el porcentaje de pérdida que sufrieron las rocas finalizado el ensayo. En ella se destaca el basalto por su gran pérdida de material, el cual no llegó a cumplir los veinte ciclos sino que experimentó la pérdida del 98% al quinto ciclo. Esta pérdida temprana se puede atribuir a la porosidad ($10,8\% \pm 1,27$, promedio) que posee esta roca.

Otra roca que experimentó grandes pérdidas, pero presenta una porosidad baja, del 0,96% promedio, es la metacaliza. Esta roca tiene una pérdida del 53% para las granulometrías mayores y del 71% para las más pequeñas. A través de revisión bibliográfica se observa que esto se puede deber a dos posibles causas: 1) el tamaño y distribución de poros; que según Benavente (2002) cuanto más pequeño sea el tamaño de los poros, mayor será la presión de cristalización producida, por lo tanto mayor será la pérdida (ver cap. antecedentes). 2) expansión térmica del mineral de calcita, este mineral (del cual se compone esta roca, ver página 25) es el único que al calentarse se expande en una dirección mientras se contrae en la otra; y, al enfriarse, se contraerá a lo largo del eje c, mientras se expande a lo largo de los otros (Siegismund & Snethlage 2010), lo que va a producir fracturas en los cristales, lo que conduce al deterioro de la roca.

El resto de las muestras que poseen porosidad baja no experimentan grandes pérdidas. Cabe destacar que si bien en el caso de la pizarra negra se observó cristalización de Na_2SO_4 en algunos de sus planos de estratificación (Fig. 28), no mostró grandes pérdidas, aunque sí mayores que el resto de las pizarras que presentan porosidad cercana a cero.

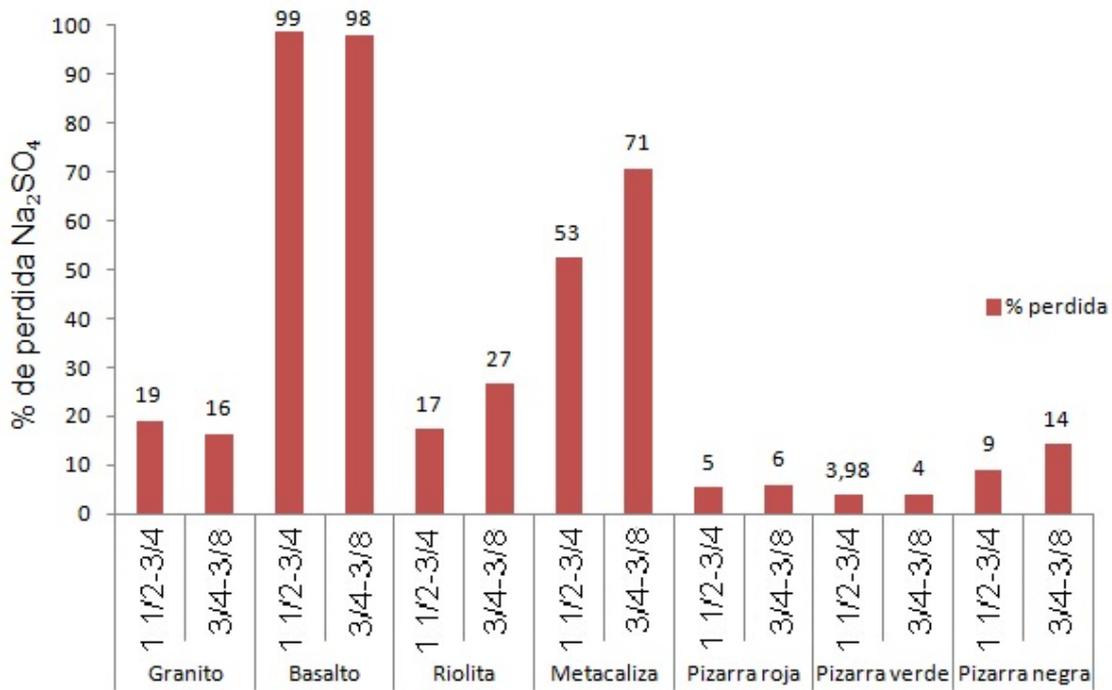


Fig.27. Gráfico de porcentaje de pérdida de las muestras ensayadas con sulfato de sodio (valores en anexo, Tabla III). Donde 1 1/2" a 3/4" = 37,5 mm a 19 mm y 3/4" a 3/8" = 19 mm a 9,5 mm.

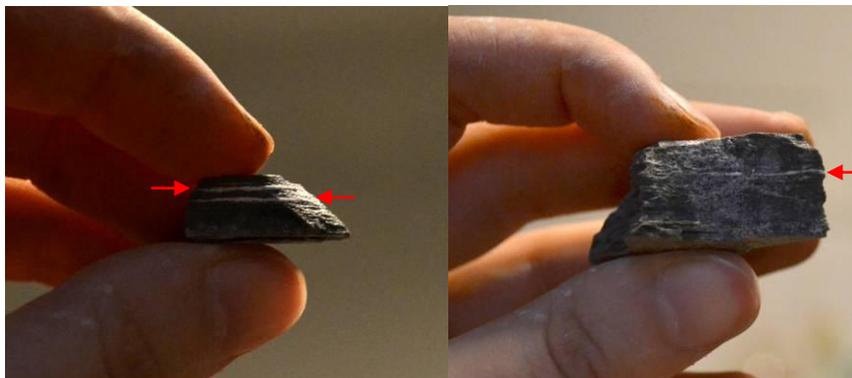


Fig.28. Muestra de pizarra negra con cristalización de Na_2SO_4 indicado con las flechas.

Luego del tamizado, se realizó el examen cualitativo en las granulometrías mayores (37,5 mm a 19 mm o 1 1/2" a 3/4"), como indica la norma. Se separan las partículas de cada muestra en grupos de acuerdo al efecto que produce la acción del sulfato de sodio y se registra el número de partículas que han sido afectadas. Las afectaciones se ilustran en la tabla 7 (a modo de ejemplo en la Fig. 29 muestra el antes y después de la muestra de metacaliza).

Existen dos casos en los cuales no se realizó esta cuantificación, uno fue la muestra de basalto, que al quinto ciclo, casi la totalidad de la muestra se había desagregado (Fig. 30) y otra fue el granito que sufrió arenización al termino de los veinte ciclos (Fig. 31), no es fácil saber que porcentaje de muestra se desgranó ya que lo hace de una manera pareja y sin marcas visibles, a las demás muestras se las pudo cuantificar.

Tabla 7. Cuantificación de pérdida en ensayo de Na₂SO₄.

Muestra	Fisuradas		Redondeadas		Total de partículas de tamaño 1 1/2" - 3/4". ^{II}
	No. ^I	%	No. ^I	%	
Riolita	32	60,4	--	--	53
Metacaliza	--	--	9	31	29
Pizarra roja	3	5,4	52	94,5	55
Pizarra verde	--	--	24	40,7	59
Pizarra negra	5	8,5	54	91,5	59

^I Número de partículas que fueron afectadas. ^{II} Total de partículas retenida en los tamices de 1 1/2" - 3/4".



Fig. 29. La imagen ilustra como fueron afectadas las muestras de metacaliza luego del ensayo Na₂SO₄. (a: la muestra al comienzo del ensayo. b: foto de los fragmentos representativos retenidos en el tamiz 3/4" al final del ensayo. c: Fragmentos de lo retenido en el tamiz ciego al final del ensayo.)



Fig.30. a: Muestra de basalto antes del ensayo. b: luego de tamizado lo que quedó en tamiz ciego. c: Todo lo que quedó retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$.



Fig.31. Muestra de granito retenido en el tamiz ciego.

Al comparar los porcentajes de pérdida de ambos ensayos (Fig. 32) es claro que en general las rocas experimentan mayores pérdidas cuando son ensayadas con Na_2SO_4 que con humedecimiento y secado, sin existir una correlación clara entre ambas pérdidas.

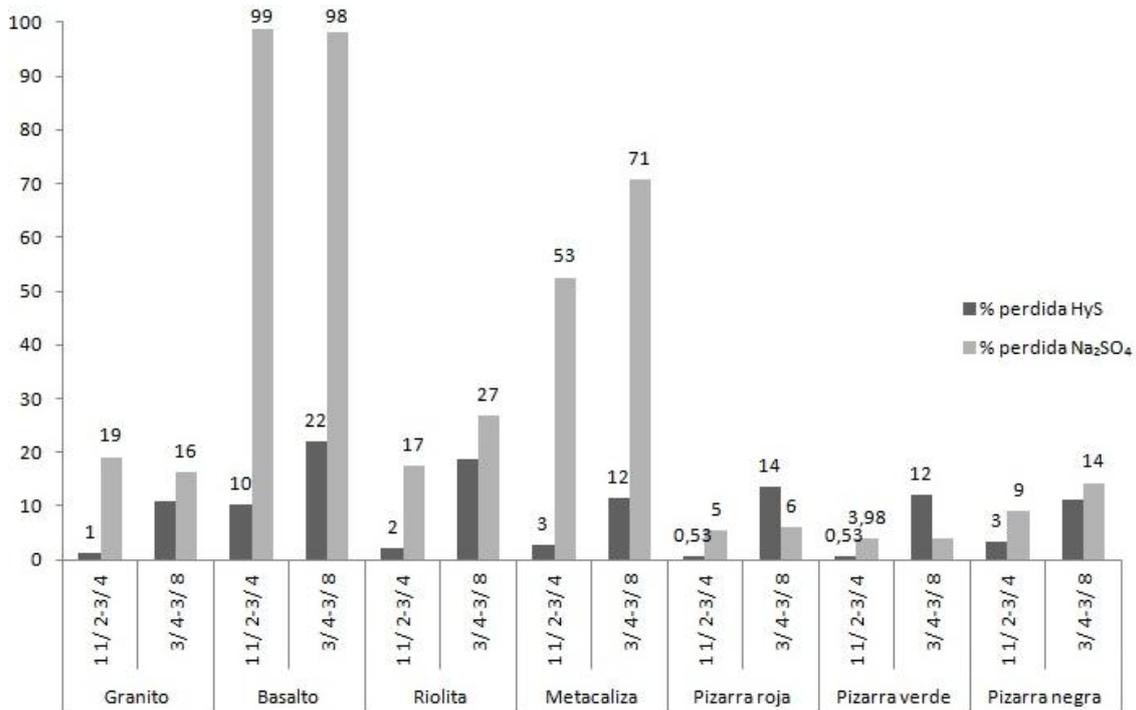


Fig.32. Gráfico que compara el porcentaje de pérdida que sufrieron las muestra durante el ensayo de humedecimiento y secado (HyS) y ensayo de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) (valores en anexo, Tabla III). Donde 1 1/2" a 3/4" = 37,5 mm a 19 mm y 3/4" a 3/8" = 19 mm a 9,5 mm.

Al observar el gráfico se identifica que existe una excepción que son las muestras de pizarra roja y verde que en sus granulometrías menores (19 mm a 9,5 mm) experimentan mayores pérdidas en el ensayo de humedecimiento y secado que en el de Na_2SO_4 . Esto se puede deber al movimiento realizado durante el tamizado, ya que en el ensayo de humedecimiento y secado se realiza cada cinco ciclos y en el ensayo de cristalización de sales solo se realiza al final, este rompe los bordes, las zonas de menor cohesión de las muestras, dando como resultado pequeñas pérdidas de material.

6. Discusión y conclusiones.

En rasgos generales se comprobó lo citado en los antecedentes por Siegesmund & Snethlage (2010) de la porosidad como uno de los parámetros más importantes en la roca, ya que tiene un efecto directo e indirecto sobre la mayoría de las propiedades físicas de las rocas. Si se compara a grandes rasgos las propiedades petrofísicas entre sí, se observa que para rocas con porosidades entre 4 – 20% (aproximadamente) poseen densidades aparentes bajas y absorción de agua alta. Además, se observó que estas rocas no sólo experimentaron pérdida de material cuando se hicieron los ensayos de alteración, sino que también cuando se estaban saturando para los ensayos petrofísicos, lo que ya anticipaba el comportamiento ante los ensayos de alteración. Lo inverso sucede con porosidades bajas (0 – 3% aproximadamente), en cuanto a la comparación de propiedades petrofísicas entre sí porque el comportamiento de algunas de estas rocas varía en el ensayo de alteración.

Las rocas de porosidades bajas que experimentan pérdidas elevadas en los ensayos de alteración y sobre todo en el de cristalización de Na_2SO_4 son el granito y la metacaliza. Para el caso del granito este comportamiento ante el sulfato de sodio puede deberse a los pequeños tamaños de los poros (microfisuras que son un tipo de poro) que poseen un radio promedio de $0,070\mu\text{m}$ (dato obtenido por comunicación personal con Morales Demarco sobre porosimetría de inyección de mercurio sobre este mismo granito) ya que según Benavente (2002) cuanto más pequeño sea el tamaño de los poros, mayor será la presión de cristalización producida, por lo tanto mayor será la pérdida. Con respecto a la metacaliza su comportamiento también puede estar influenciada por el tamaño del poro (del cual no existen datos hasta el momento), pero también puede deberse a su mayor componente mineral que es la calcita, que por su particular comportamiento frente al calor (ver cap. de resultados, página 43) le causa fracturas a los cristales, en las cuales se pudo

cristalizar Na_2SO_4 dando como resultado mayor pérdida de material en este ensayo que en el caso del ensayo de humedecimiento y secado.

En cuanto a los ensayos de alteración en rasgos generales, en ambos ensayos, las partículas de tamaños menores (19 mm a 9,5 mm) se afectan más, que las partículas de mayor tamaño. Al comparar los porcentajes de pérdida de ambos ensayos es claro que en general las rocas experimentan mayores pérdidas cuando son ensayadas con Na_2SO_4 que con humedecimiento y secado, sin existir una correlación clara entre ambas pérdidas. Pero se reconoció un patrón de pérdida en el ensayo de humedecimiento y secado que para las muestras que no experimentan más del 2% de pérdida en el quinto ciclo del ensayo, no experimentarán pérdidas mayores al 1% en los ciclos sucesivos.

Como conclusión final es importante resaltar dos apreciaciones, primero la relevancia que tiene la realización de este tipo de ensayos al momento de utilizar rocas para obra civil u ornamental, ya que colocar una roca no adecuada para las condiciones a que las se expone, puede generar un gasto muy alto en mantenimiento o un daño irreversible en la misma. Segundo en este trabajo se muestra que con equipos comunes de laboratorio y bajo presupuesto se pueden realizar ensayos petrofísicos como porosidad, absorción de agua, densidad, velocidad de propagación de ondas sónicas y ensayos de alteración como humedecimiento y secado, y cristalización de sulfato de sodio, y obtener resultados muy similares que los mismos ensayos realizados a nivel mundial en laboratorios mejor equipados y con mayor presupuesto.

ANEXO

Tabla I: Valores de todas las muestras ensayadas.

Muestra	n(%)	w(%)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\text{matriz}}(\text{kg/m}^3)$	Vp(m/s)	Vp(m/s) paralelo	Vp sat(m/s)	Vp sat(m/s) paralelo
Granito A	1,30	0,48	2679,27	2714,17	5234,07		5753,85	
Granito B	0,28	0,10	2681,24	2688,79	5217,85		5614,00	
Granito C	0,30	0,11	2693,53	2701,74	5273,54		5710,41	
Granito D	0,27	0,10	2683,04	2690,30	5143,21		5686,46	
Granito E	0,37	0,14	2648,66	2658,44	4748,64		5350,81	
Basalto A	9,19	3,27	2572,77	2809,15	2284,33		3356,92	
Basalto B	12,11	4,29	2521,41	2826,83	3360,39		3989,73	
Basalto C	12,11	4,26	2535,56	2842,51	3030,94		3784,82	
Basalto D	10,47	3,80	2495,97	2757,27	2511,10		3596,98	
Basalto E	10,25	3,70	2509,51	2766,66	2821,04		3918,83	
Riolita A	2,29	0,90	2492,90	2549,99	4413,27		4605,25	
Riolita B	2,58	1,01	2482,62	2546,72	4482,78		4564,42	
Riolita C	1,65	0,65	2485,68	2526,73	4352,98		4293,63	
Riolita D	4,72	1,79	2518,44	2637,41	4493,64		4778,40	
Riolita E	3,29	1,26	2522,46	2605,49	4465,15		4618,51	
Metacaliza A	1,30	0,47	2754,16	2790,03	5641,01		6027,33	
Metacaliza B	1,06	0,38	2754,26	2783,38	5343,03		5477,25	
Metacaliza C	1,28	0,46	2754,39	2789,55	5559,87		5961,72	
Metacaliza D	0,98	0,35	2759,51	2786,43	5378,94		5667,74	
Metacaliza E	0,18	0,06	2805,06	2810,09	6704,78		6723,65	
Pizarra Roja A	0,07	0,03	2826,46	2828,50	5357,14	6552,63	5625	6728,35
Pizarra Roja B	0,01	0,00	2831,55	2831,91	5659,09	6500,50	5928,57	6500,50
Pizarra Roja C	0,07	0,02	2827,31	2829,27	4936,78	6348,99	5422,62	6373,08

Pizarra Roja D	0,00	0,00	2824,36	2824,46	5717,39	6380,14	5801,47	6390,63
Pizarra Roja E	0,00	0,00	2823,75	2823,75	5711,96	6694,85	5711,96	6694,85
Pizarra Verde A	0,10	0,03	2814,33	2817,05	5352,94	6527,41	5687,50	6481,49
Pizarra Verde B	0,15	0,05	2812,46	2816,54	4912,36	6329,70	5478,40	6090,46
Pizarra Verde C	0,06	0,02	2815,81	2817,62	5991,67	6470,71	5991,67	6470,71
Pizarra Verde D	0,10	0,04	2815,24	2818,16	5360,29	6510,23	5648,24	6481,58
Pizarra Verde E	0,20	0,07	2817,45	2822,96	5585,94	6519,29	5585,94	6519,29
Pizarra Negra A	0,28	0,10	2743,46	2751,10	4792,53	5756,62	4812,50	5788,74
Pizarra Negra B	0,37	0,14	2749,36	2759,63	4405,67	5593,75	4787,50	5593,75
Pizarra Negra C	0,49	0,18	2740,04	2753,57	5903,85	5526,53	5903,85	5478,40
Pizarra Negra D	0,37	0,14	2670,25	2680,09	4166,67	5726,19	4666,67	5726,19
Pizarra Negra E	0,47	0,17	2748,37	2761,18	2570,42	5639,79	4562,50	5499,55
Caliza A	3,18	1,30	2371,50	2447,00	4666,49		4654,49	
Caliza B	3,71	1,52	2347,34	2434,33	4991,76		4941,67	
Caliza C	5,85	2,35	2356,06	2493,89	4002,95		4008,34	
Caliza D	3,52	1,43	2376,79	2460,56	4611,78		4692,85	
Caliza E	3,54	1,40	2431,30	2517,29	4641,12		4688,24	
Arenisca A	18,94	7,83	2033,72	2419,01	1775,97		2582,43	
Arenisca B	18,34	7,57	2047,96	2423,59	1801,30		2558,05	
Arenisca C	18,36	7,60	2040,38	2414,99	1901,84		2681,91	
Arenisca D	20,18	8,36	2008,49	2413,85	1804,38		2582,90	
Arenisca E	17,66	7,26	2065,82	2430,58	2073,75		2829,23	

n: porosidad, w: absorción de agua, ρ : densidad aparente, ρ_{matriz} : densidad de matriz, V_p : Velocidad de propagación de onda, V_p sat: Velocidad de propagación de onda en muestra saturada.

Tabla II: Porcentaje de pérdida de las muestras ensayadas. Ensayo Humedecimiento y Secado.

Muestra	Tamaño	% pérdida 5º Ciclo	% pérdida 10ºCiclo	% pérdida 15º Ciclo	% pérdida 20ºCiclo
Granito	1 1/2 - 3/4	0,59	0,86	0,86	1,32
	3/4 - 3/8	7,58	8,18	8,78	10,78
Basalto	1 1/2 - 3/4	3,37	10,04	10,04	10,37
	3/4 - 3/8	10,62	13,10	17,96	21,92
Riolita	1 1/2 - 3/4	1,72	2,04	2,11	2,18
	3/4 - 3/8	13,35	15,74	16,63	18,63
Metacaliza	1 1/2 - 3/4	0,66	0,13	0,59	2,83
	3/4 - 3/8	7,77	8,47	9,56	11,55
Pizarra Roja	1 1/2 - 3/4	0,33	0,40	0,53	0,53
	3/4 - 3/8	9,11	10,81	11,91	13,61
Pizarra Verde	1 1/2 - 3/4	0,33	0,40	0,53	0,53
	3/4 - 3/8	8,68	9,58	10,48	11,98
Pizarra Negra	1 1/2 - 3/4	0,33	0,53	0,66	3,25
	3/4 - 3/8	7,64	8,93	9,72	11,11

Tabla III: Porcentaje de pérdida de las muestras ensayadas en el ciclo veinte. Ensayo Humedecimiento y secado y cristalización de Na_2SO_4 .

Muestra	Tamaño	% de Pérdida HyS	% de Pérdida Na_2SO_4
Granito	1 1/2 - 3/4	1,32	19,12
	3/4 - 3/8	10,78	16,38
Basalto	1 1/2 - 3/4	10,37	98,67
	3/4 - 3/8	21,92	98,11
Riolita	1 1/2 - 3/4	2,18	17,48
	3/4 - 3/8	18,63	26,75
Metacaliza	1 1/2 - 3/4	2,83	52,51
	3/4 - 3/8	11,55	70,79
Pizarra Roja	1 1/2 - 3/4	0,53	5,50
	3/4 - 3/8	13,61	6,06
Pizarra Verde	1 1/2 - 3/4	0,53	3,98
	3/4 - 3/8	11,98	4,08
Pizarra Negra	1 1/2 - 3/4	3,25	9,06
	3/4 - 3/8	11,11	14,31

BIBLIOGRAFÍA

Archie, G.E. (1950). Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. Vol.34, No.5 (May 1950). pp. 943-961.

Aguirre, C., Ibáñez, S., Ferraresi, P., Rodríguez Schelotto, M. (2008). Proyecto para la protección ambiental y desarrollo sostenible del sistema Acuífero Guaraní. Tomo 1, Vol. 5. pp. 5-36.

Bell, F.G. & 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 (1999). pp.57–81.

Benavente, D. (2002). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales. Tesis de Doctorado (Julio 2002).

Bossi, J. (1966). Geología del Uruguay. pp 181-209 y pp. 248-265.

Çelik, S B, Çobanoğlu, I., Atatanır, L. (2014). General material properties of Denizli (SW Turkey) travertines as a building stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 73, pp. 825-838.

Chatterjee, T.K., Chatterjee, R., Singh, S.K. (2005). Classification of black decorative stones from Warangal District, Andhra Pradesh, India. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Volume 64, Issue 2, pp. 167-173.

Comunità Economica Europea-Uruguay. Piedras Ornamentales del Uruguay. La Cartotecnica, Rovereto. Sin fecha.

Dott, R.H., Jr. (1964). Wacke, graywacke and matrix - What approach to immature sandstone classification. *Journal Sedimentary Petrology*. Vol. 34, pp. 625-632.

Esbert, R.M., Marcos, R.M., Ordaz, J., Montoto, M., Alonso, F.J., Suarez del Rio, L.M., Ruiz de Argandoña, V.G., Calleja, L. y Rodriguez Rey, Á. (1991). Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Cataluña, España (2.- parte). *Materiales de Construcción*. Vol. 41 . nº 222. abril/mayo/junio 1991. pp. 49-59.

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall Pearson Educación, Madrid, pp. 125-132.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction of rock mechanics*, 2nd Edition. John Willey & Sons. New York. Chap. 2. pp. 19-51.

Goso, H., Oyhantçabal, P., Behak, L., Umpiérrez, V. (1998a). Ensayos para la evaluación de la degradabilidad de materiales basálticos para obras viales. *Memorias del congreso, 2º congreso de la vialidad uruguaya*. pp. 117-127.

Goso, H., Oyhantçabal, P., Behak, L., Umpiérrez, V. (1998b). Los materiales basálticos y los ensayos de degradabilidad. *Memorias del congreso, 2º congreso de la vialidad uruguaya*. pp. 129-138.

Goso, C. (1999). *Análise estratigráfica do Grupo Paysandú (Cretáceo) na Bacia do Litoral Uruguaí*. Tese de Doutorado IGCE-UNESP. Rio Claro.

Goso, C. y Perea, D (2004). Cap. El cretácico post-basáltico y el terciario

inferior de la cuenca litoral del Río Uruguay: Geología y Paleontología. Cuencas sedimentarias de Uruguay, Geología, paleontología y recursos naturales, Mesozoico: pp. 143-167.

Grossi, C.M. y Esbert, R.M (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica. Materiales de Construcción, vol.44, nº 235, julio/agosto/septiembre 1994. pp.15-30.

Hamad, B. S., Khoury, G.R. & Khatib, H. (2001). Petrographic, mechanical and chemical properties of major coarse aggregate resources in Lebanon, eastern Mediterranean Bull Eng Geol Env 59 : pp. 297–305.

I.N.V.E-220-07. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de Sulfato de sodio o de Magnesio. Instituto nacional de vias.

Lage Ladeira, F. e Minette, E., (1984a). A quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. 4º CBGE – Belo Horizonte. pp. 351-358.

Lage Ladeira, F. e Minette, E., (1984b). Índice físico de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. 4º CBGE – Belo Horizonte. pp. 359-366.

Medina Estefan, E. (2014). Informe ambiental, resumen de un estudio de impacto ambiental de una concesión para explotar granofiro para obtener piedra partida (min de clase III). Expediente: 2013/15539, titular: OVEJERA. S.A.

Morales Demarco, M. (2012). Mineralogical, petrophysical and economical characterization of the dimensional stones of Uruguay; implications for deposit exploration. Dissertation zur Erlangung des

Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität Göttingen.

Muzio, R. (2004). Cap. El magmatismo mesozoico en Uruguay y sus recursos minerales. Cuencas sedimentarias de Uruguay, Geología, paleontología y recursos naturales, Mesozoico: pp. 77-99.

Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., Rossi, P. (1985). Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, pp. 19, 46-49.

Oyhantçabal, P., Derrégibus, M., Muzio, R., Nardi, L. (1998). The Soca intrusion: a rapakivi granite of Uruguay, Journal of South American Earth Sciences, Vol. 11, No. 2, pp. 169-178.

Oyhantçabal, P., Siegesmund, S., Wemmer, K. (2011). The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), Springer pp.201-220.

Rivas Brea, T., Prieto Lamas, B., Silva Hermo, B. (2008). Ensayos de alteración artificial aplicados a rocas graníticas. Materiales de Construcción, Vol. 58, pp. 289-290, pp. 179-189, enero-junio 2008.

Robertson, S. (1999). BGS Rock classification scheme. Volume 2. Classification of metamorphic rocks. British Geological Survey Research Report, RR 99-02.

Siegesmund, S. & Snethlage, R. (2010). Stone in Architecture. Properties, Durability, Fourth Edition, Springer. Chap. 3 pp. 97-134 y Chap. 4 pp. 227-316.

Sousa, L.M.O. (2014). Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 73, Issue 2, pp 569-588.

Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12, pp 1-33.

Tófalo, O. R. & Pazos, P. J. (2010). Paleoclimatic implications (Late Cretaceous–Paleogene) from micromorphology of calcretes, palustrine limestones and silcretes, southern Paraná Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol.29, pp 665-675.

Tugrul, A. & Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng. Geol.* 51: pp. 303-317.

Ulusay, R. & Hudson, J.A. (2007). The complete ISRM suggested methods for rocks characterization, testing and monitoring:1974-2006.

Umpierre, M. y Halpern, M. (1971). Edades estroncio-rubidio en rocas cristalinas del sur de la República Oriental del Uruguay. *Rev. de la asociación geológica Argentina*. Tomo XXVI, nº 2.

Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. (2004). Cap. Calizas de Queguay: Génesis y potencial económico. *Cuencas sedimentarias de Uruguay, Geología, paleontología y recursos naturales, Cenozoico*: pp. 269-296.

Agradecimientos.

Quiero agradecer al Prof. Dr. Pedro Oyhantçabal y Prof. Dr. Marcos Musso por el tiempo, dedicación y paciencia que le han ofrecido a este trabajo.

A Cinthia Planchon y Ing. Gonzalo Cetrángolo que me prestaron el equipo de ultrasonido para poder realizar el ensayo, a la Ing. Patricia Erlich que nos abrió las puertas del MTOP para poder triturar las muestras, a Natalia Porta y Daniel Pichi por cortar las muestras, a todo el personal del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) por permitirme utilizar sus instalaciones y la colaboración brindada en más de una oportunidad, y a Elisa Dalmas ya que juntas recolectamos parte de las muestras de este trabajo que también fueron parte del proyecto PAIE que realizamos juntas, gracias por su compañía.

Por supuesto agradecerle a todos los docentes de la Licenciatura en Geología por su dedicación, a mis compañeros y amigos de la licenciatura por la compañía y hacer el camino más ameno.

Por último agradecer a las personas más importantes, mi familia por el apoyo incondicional que siempre me han dado y sobre todos a mis padres que siempre me han acompañado y apoyado en todas mis decisiones.

A todos... ¡Gracias!