



Caracterización tecnológica y geomecánica de la formación Huaylillas para fines de uso ornamental en la ciudad de Tacna

Technological and geomechanical characterization of the Huaylillas formation for ornamental use in the city of Tacna

^{1,a*} Juan Diego Villanueva Arotinco

^{1,b} Fredy Cleto Cabrera Olivera

ARTÍCULO ORIGINAL	RESUMEN
<p>¹ Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.</p> <p>Correspondencia: *jvillanueva@unjbg.edu.pe</p> <p>^a ORCID: 0000-0002-3643-5909 ^b ORCID 0000-0003-1429-8728</p>	<p>El área de estudio se centra en la formación Huaylillas, y se encuentra en los alrededores de la ciudad de Tacna. No se ha identificado qué zonas presentan características potenciales para uso ornamental. Se realizó un mapeo geológico-geomorfológico y geomecánico, con el objetivo de hacer una caracterización tecnológica y geomecánica. Se realizaron 22 estaciones geomecánicas para obtener una caracterización, revelando que el miembro inferior del Huaylillas es una roca mala y el miembro superior es una roca buena a regular, al acercarse a la Fm. Millo o al contacto con el Huaylillas Inferior la roca descende su calidad RMR. Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de 20 muestras donde los valores obtenidos son: porosidad (1,6-32,4%), densidad seca (1,5-2,3 gr/cm³), absorción (0,7-20,4%), peso específico (2,0-2,5 gr/cm³) y la resistencia a la compresión uniaxial (7,98-91,45 Mpa). Se tiene tobas consolidadas con litología vitroclastolítica con textura Vitrofidica, Eutaxítica y Perlítica de composición riolítica a traquítica. Esta tesis concluye que el miembro inferior es de mala calidad y el miembro superior de la Fm. Huaylillas es de mejor calidad considerando el halo de alteración (15 a 20 m) de los contactos de la Fm. Millo y la Fm. Huaylillas Inferior. Se ubican 02 zonas como canteras, ubicadas en la quebrada Caramolle y en la quebrada cercana al Km 17 de carretera Tarata.</p>
<p>Palabras clave: tobas, Huaylillas, caracterización, propiedades físico-mecánica.</p> <p>Keywords: Tuffs, Huaylillas, Characterization, physical-mechanical properties</p>	
<p>Información adicional</p> <p>Presentado: 19/10/2023 Aprobado: 29/11/2023</p>	<p>ABSTRACT</p>
	<p>The study area focuses on the Huaylillas formation located around the city of Tacna, where no zones with potential ornamental use have been identified. A geological-geomorphological and geomechanical mapping was carried out with the aim of providing a technological and geomechanical characterization. Twenty-two geomechanical stations were conducted to obtain a characterization, revealing that the Lower Huaylillas member is poor rock and the upper member is fair to good rock. As it approaches the Millo Formation or the contact with the Lower Huaylillas, the rock's RMR quality decreases. The physical and mechanical properties of 20 samples were determined, yielding the following values: porosity (1.6-32.4%), dry density (1.5-2.3 g/cm³), absorption (0.7-20.4%), specific weight (2.0-2.5 g/cm³), and uniaxial compressive strength (7.98-91.45 MPa). Consolidated tuff with vitroclastolithic lithology and Vitrophydic, Eutaxitic, and Perlitic texture of rhyolitic to trachytic composition was identified. This thesis concludes that the lower member is of poor quality and the upper member of the Fm. Huaylillas is of better quality considering the halo of alteration (15 to 20 m.) of the contacts of the Fm. Millo and the Fm. Huaylillas Inferior, 02 zones are located as quarries located in the Caramolle ravine and in the ravine near Km 17 of the Tarata highway.</p>

INTRODUCCIÓN

Las rocas ornamentales han sido utilizadas en muchos países desde la antigüedad, incluyendo Europa y Perú. Hasta los inicios del siglo XX, estas rocas dominaban la mampostería estructural, especialmente las tobas volcánicas, siendo una de las más conocidas en Perú el Sillar de Arequipa. Sin embargo, con el desarrollo de las estructuras de acero, las rocas ornamentales se utilizaron principalmente como revestimiento de exteriores e interiores, esculturas, pavimentos, monumentos y estatuas.

El presente estudio se enfoca en la importancia de conocer las características tecnológicas y geomecánicas de las rocas ornamentales de la formación Huaylillas, en la industria de la construcción. Morales et al, 2019: “Es necesario conocer en las regiones de Tacna y Moquegua el potencial efectivo de recursos no metálicos susceptibles de ser explotados como rocas”.

Como referencia inicial se tiene el artículo de Ciencia & Desarrollo denominado “Potencial de las rocas ornamentales en las regiones Tacna y Moquegua”, donde menciona las tobas del Huaylillas (Morales et al, 2019), así mismo la terminología “Características Tecnológicas” hace referencia al conocimiento de las características físicas, mecánicas y químicas más importantes, mediante parámetros factibles de evaluar y cuantificar, mencionado en el boletín N°9 Serie B, Rocas ornamentales en el Perú, Geología Económica.

El Journal de ciencias “Engineering properties of volcanic tuff from the western part of Yemen”, menciona parámetros en las tobas de Yemen, siendo las siguientes: relación de vacío [0,001-0,25], porosidad [0,1-20,0], densidad [1,8-3,0] y resistencia a la compresión uniaxial [>10 MPa].

El objetivo principal de este trabajo es determinar las características tecnológicas y geomecánicas de la formación Huaylillas en la zona de estudio respecto a sus propiedades físico-mecánicas, químicas y mineralógicas para su uso ornamental en la ciudad de Tacna, que actualmente no son utilizadas ni extraídas de forma masiva. Se propone explorar el potencial de devolver el valor estético a estas rocas mediante su uso como revestimiento cementado o anclado mecánicamente en edificios u obras recreacionales, mejorando su apariencia y protegiéndolos de los procesos de meteorización.

Si se realiza la caracterización tecnológica y geomecánica de la formación Huaylillas, respecto a sus propiedades físico-mecánicas, químicas y mineralógicas, con fin de uso ornamental, entonces es posible reconocer los diferentes tipos de rocas que hay en la formación Huaylillas y además determinar qué usos se les pueda dar ya sean para piedra dimensional en interiores o exteriores, en fachadas o para esculturas arquitectónicas, entre otras.

La importancia de las características que se deben investigar cuando se desea emplear rocas ornamentales en la construcción, arte estatuario, arte funerario y otros usos, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Características tecnológicas a considerar para el uso de rocas ornamentales

N°	Caracterís- ticas Tecno- lógicas	Revestimiento		Pavimentos		Pelda- ños de escalera	Colum- na y pilares	Pedes- tales	Mesas	Escul- turas	Lapidas y Mau- soleos	Ador- nos
		Interio- res	Exterio- res	Interio- res	Exterio- res							
1	Descripción petrográfica	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	PI
2	Análisis químico	PI	PI	PI	PI	PI	I	I	PI	I	I	PI
3	Peso especí- fico aparente	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	PI
4	Absorción de agua	PI	I	PI	I	PI	MI	MI	I	MI	I	I
5	Porosidad	I	I	I	MI	I	I	I	I	MI	I	PI
6	Dilatación térmica lineal	I	MI	I	I	PI	I	PI	I	PI	PI	PI
7	Resistencia al impacto	PI	PI	PI	PI	I	PI	PI	MI	PI	PI	PI
8	Resistencia a la compre- sión	PI	I	PI	I	I	MI	I	I	I	I	PI
9	Resistencia a la flexión	PI	I MI (1)	I	I	I	MI	I	MI	I	I	PI
10	Resistencia al desgarre	PI	PI	I	MI	MI	MI	MI	MI	MI	I	PI
11	Resistencia al corte	PI	PI	PI	PI	PI	MI	I	MI	I	I	PI
12	Resistencia a la tracción	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
13	módulo de deformación estática	PI	PI	I	I	I	MI	I	PI	PI	PI	PI
14	Alterabilidad	I	MI	I	MI	I	MI	MI	I	MI	I	PI

Nota: MI=Muy importante, PI= Importante, PI=Poco importante, (I) En caso de edificios altos, (2) Valor obtenido matemáticamente.

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2001)

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en las cercanías de la ciudad de Tacna (ver Figura 1), en las zonas conocidas como quebrada Caramolle, quebrada del Diablo, zona Magollo, Cerro Intiorko, entre otros, en la provincia de Tacna, departamento de Tacna, a una altitud que varía entre los 265,00 m.s.n.m. hasta los 1200,00

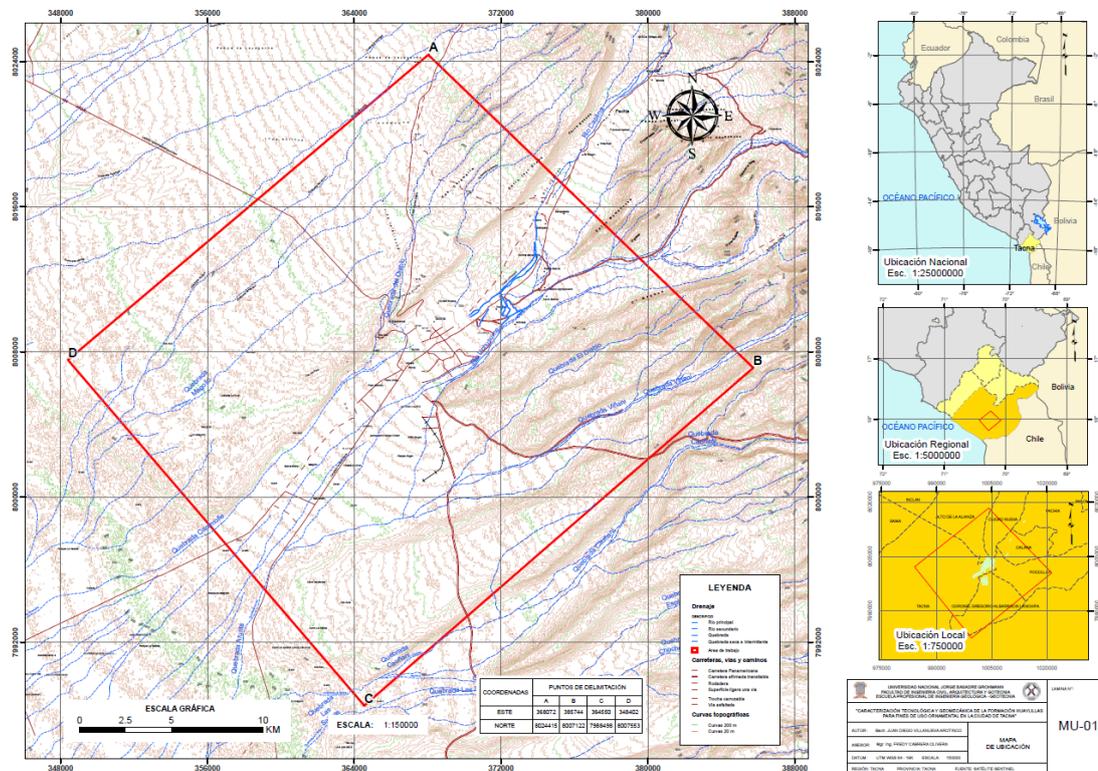
m.s.n.m. El área de estudio se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas UTM WGS 84 -19K, ver Tabla 2.

Tabla 2
Coordenadas de delimitación del área de estudio

COORDENADAS	PUNTOS DE DELIMITACIÓN			
	A	B	C	D
<i>Este</i>	368072,00	385744,00	364550,00	348402,00
<i>Norte</i>	8024415,00	8007122,00	7988498,00	8007553,00

Nota. Elaboración propia.

Figura 1
Ubicación de área de Estudio



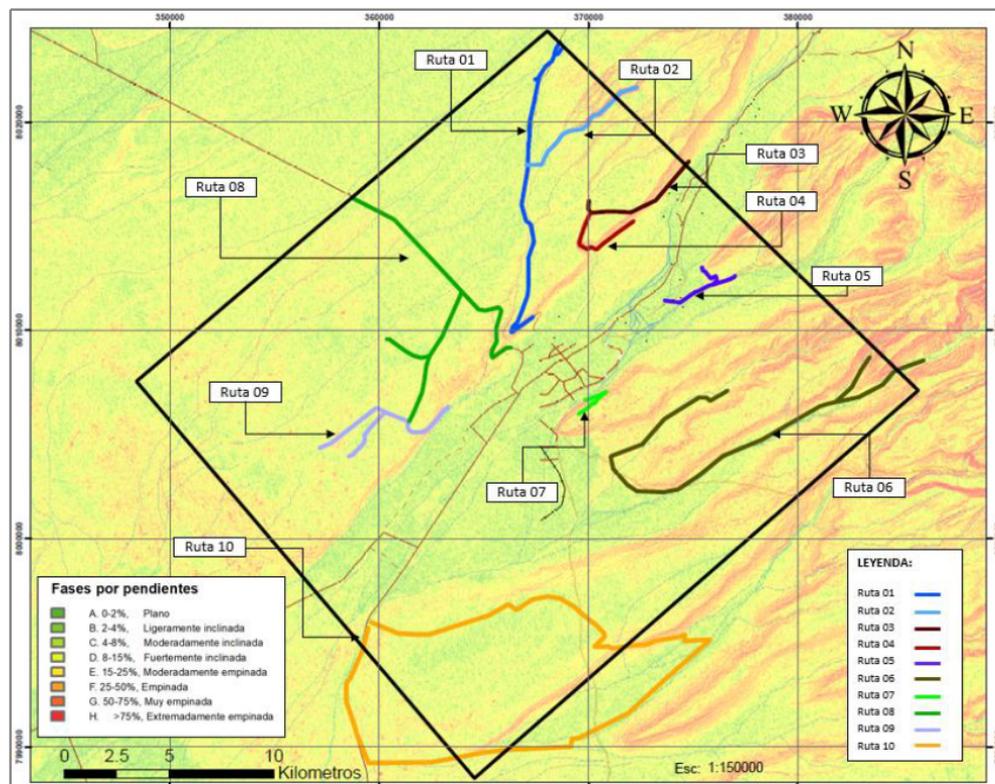
Nota. Elaboración propia.

Para llevar a cabo la recopilación de información, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda en la base de datos del INGEMET, donde se encontraron referencias geológicas y topográficas en los cuadrángulos 36v2, 36v3, 37v1 y 37v4. El siguiente paso fue la realización de visitas de campo, que involucraron a un equipo de tres personas, con el propósito de recolectar datos de campo, incluyendo descripciones geomorfológicas y geológicas.

Mediante la descripción de las zonas visitadas, se trazaron y se recorrieron un total de 10 rutas, tal como se muestra en la Figura 2, abarcando toda el área de estudio. Para llevar a cabo el mapeo geológico, se hizo uso de la base topográfica proporcionada por el INGEMMET, así como de imágenes satelitales. Además,

se utilizó una variedad de herramientas y equipos, como 02 brújulas, 02 lupas de 10X, ácido clorhídrico, GPS, 02 picotas geológicas, lápices de dureza, protector y bolsas de muestreo.

Figura 2
Rutas de recorrido en área de Investigación

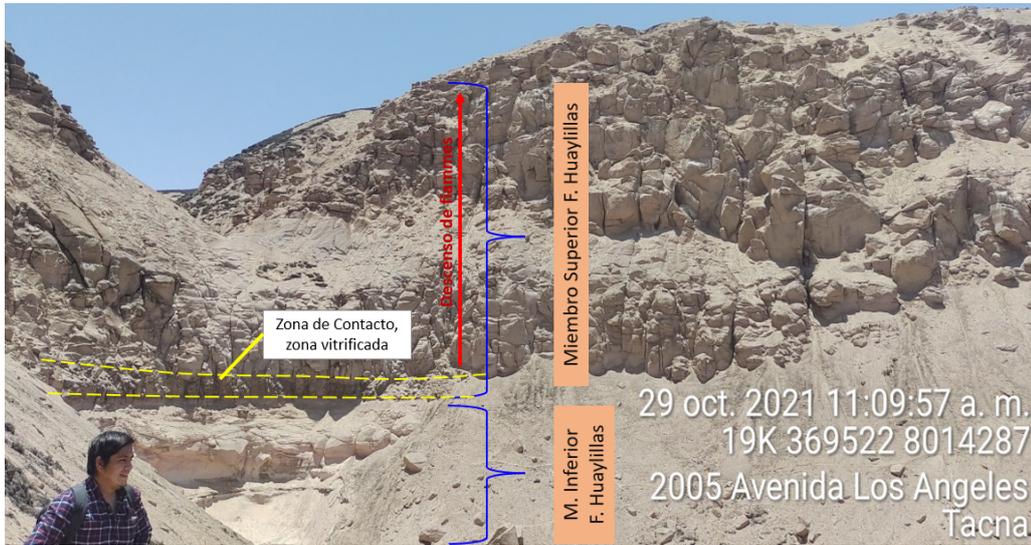


En esta investigación, se tomó como referencia bibliográfica para la estratigrafía de la Formación Huaylillas el trabajo de Sánchez et al. (2000). Como resultado, fue fundamental comprender con precisión los límites superiores e inferiores de la Formación Huaylillas Superior, con el fin de llevar a cabo el reconocimiento geológico de la roca ornamental en estudio. Por lo que, se estableció que la Formación Millo yace por encima de la Formación Huaylillas Superior, mientras que la Formación Huaylillas Inferior se encuentra por debajo de esta última, las cuales presentan características únicas que permiten identificar los contactos en el horizonte de la formación.

Figura 3
Geología Local



Figura 4
Quebrada Caramolle



Nota. Vista NWW-SEE, se observa el contacto entre el miembro inferior y superior. Foto propia.

Posterior al reconocimiento y descripción del área de estudio se procedió a seleccionar las zonas de interés según la descripción realizada y los fines de roca de tipo ornamental que se buscaba en la Formación Huaylillas. Para estas zonas escogidas se procedió a realizar la siguiente caracterización:

Características Tecnológicas:

Evalúa la aptitud de la roca ornamental para el uso determinado que se dará, Ramírez y La Riva, 2001.

a) Descripción Petrográfica: Descripción de la muestra de roca.

- Macroscópica: De forma visual. Descripción del color, dureza, reacción al ácido clorhídrico, descripción de matriz y fragmentos líticos.
- Microscópica: Con el soporte del microscopio óptico y electrónico, usando 11 secciones delgadas. El microscopio electrónico de barrido, SEM (Scanning Electron Microscopy) es un método que utiliza electrones para analizar la superficie de la muestra.

b) Propiedades Físicas: Se realizan ensayos de laboratorio para obtener la relación de vacíos, porosidad, densidad, peso específico aparente y absorción, de 20 muestras distribuidas en columnas estratigráficas de la Formación Huaylillas.

c) Propiedades Mecánicas: Se realiza prueba de resistencia de carga puntual y compresión Uniaxial de 20 muestras.

d) Alterabilidad: Con la información obtenida en el mapeo geológico, descripción petrográfica, propiedades físicas y mecánicas, se realizan 10 ensayos de resistencia a la alteración mediante la durabilidad al Sulfato de Magnesio según la NTP 400.016.

Para ellos se usaron 02 muestras por punto con una dimensión cubica de 50x50x50 cm.

Características Geomecánicas:

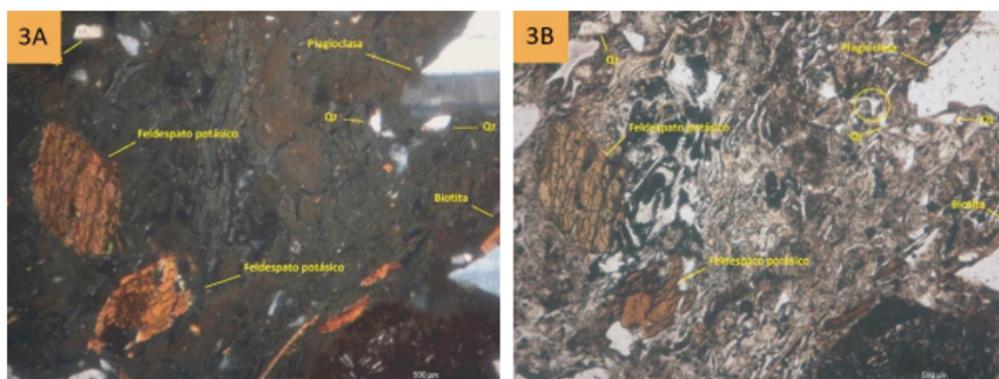
- a) Mapeo Geomecánico: Después de haber caracterizado tecnológicamente las zonas de interés del área de estudio y de tener claro los contactos y descripción geológica, se procede a realizar el mapeo geomecánico mediante el método de la línea de detalle en los diferentes taludes.
- b) Clasificación Geomecánica: La clasificación geomecánica se realiza según Bieniawski, 1989.
- c) Valoración: La cantera se evalúa según la accesibilidad, homogeneidad, calidad de roca y usos que se le pueda dar.

RESULTADOS

En la Tabla 3 se evidencian los resultados de la descripción petrográfica microscópica analizados por el microscopio polarizante en 11 secciones delgadas.

Figura 5

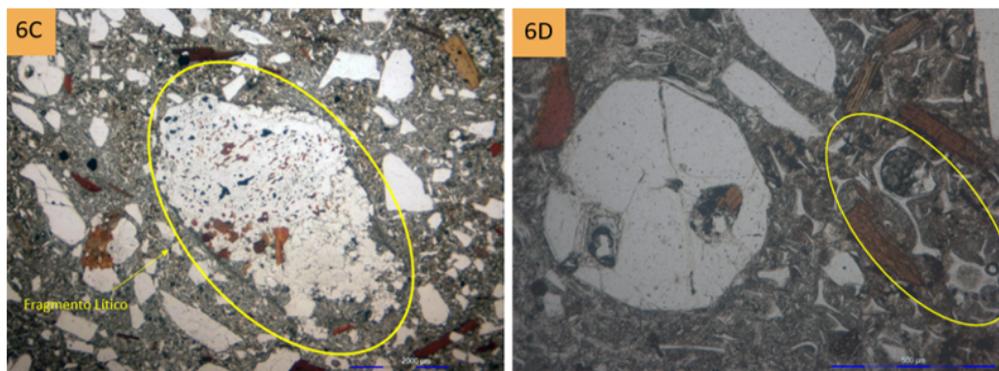
Sección Delgada TC-04



Nota. Roca de textura vitrofidica y eutaxítica, cristales de feldespato potásico, cristales subhedrales.

Figura 6

Sección Delgada TP-01



Nota. Luz transmita en Nícoles paralelos, fragmento lítico (izquierda) y textura perlítica (forma concéntrica)

Tabla 3
Resumen de descripción mineralógica

Zona	Ubicación	Código	Textura	Minerales Esenciales			Minerales	Mine- rales Opacos	Frag- mentos Líticos	Ma- triz	Total
				Cuarzo	F. Potá- sico	Plagio- clasa	Biotita				
CARAMOLLE I	Medio	TC-01	Vitrofidica	7,86		17,5	3,18	1,31	8,29	61,9	100
	Medio	TC-03	Vitrofidica y parcialmente Eutaxítica	19,9		13,2	4,41	4,41	6,62	51,5	100
	Base	TC-04	Vitrofidica y Eutaxítica	7,86	13,1	6,11	8,29	3,74	7,75	53,2	100
CARAMOLLE II	Medio	TC-06	Vitrofidica y parcialmente Eutaxítica	12,7		25,4	8,47	2,96	3	47,5	100
CARRETERA TARATA	Techo	TT-01	Vitrofidica y Perlítica	8,55		16,91	5,99	7,85	2	58,7	100
CARRETERA PANAMERICANA	Techo	TP-01	Vitrofidica y Perlítica	1,20	3,06	28,8	4,38	3,06	10	49,5	100
	Medio	TP-02	Vitrofidica y parcialmente Eutaxítica	18,9		21,8	1,2	3,06	5,01	50,1	100
TROCHA MAGOLLO	Medio	TM-02	Vitrofidica	12,7		22,3	2,64	1,75	8	52,6	100
CARRETERA TARATA KM 17	Medio – “I”.	RO-01	Vitrofidica y parcialmente Perlítica	3,01		30,2	5,98	1,31	7	52,6	100
TROCHA CUARTEL TARAPACA	Medio	RO-03	Vitrofidica y parcialmente Perlítica	10		22,8	1,33	13,09	5	47,8	100
	Base	RO-04	Vitrofidica y Eutaxítica	3,83		13,9	12,43	1,47	3	65,4	100

Nota. Muestras de rocas de la formación Huaylillas observadas bajo el microscopio polarizante. “I”, intemperizado. Elaboración Propia.

La mayoría de las muestras son tobas soldadas o consolidadas (Ignimbritas, flujos piroclásticos) de composición Andesítica-Traquítica (Ver Figura 7), con una textura mayormente vitrofidica, en el contacto superior con la Fm. Millo presenta en algunas zonas textura Perlítica (ver Figura 6), mientras que en el contacto inferior con la Fm. Huaylillas Inferior se tiene una textura Eutaxítica en las muestras TC-03, TC-04 (ver Figura 5), TP-02 y RO-04. Se han encontrado cristales de plagioclasa, Feldespatos Potásicos, Cuarzo, Biotita, minerales opacos y fragmentos líticos.

En la Tabla 4 se muestra los datos obtenidos mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) el cual permite obtener la composición de óxidos de roca total, datos requeridos para interpretar al diagrama TAS (Total Alkalis vs Silica) planteado por Le Maitre et al., 2002 y obtener la clasificación química del tipo de roca.

Tabla 4

Composición de óxidos en Wt% de roca total

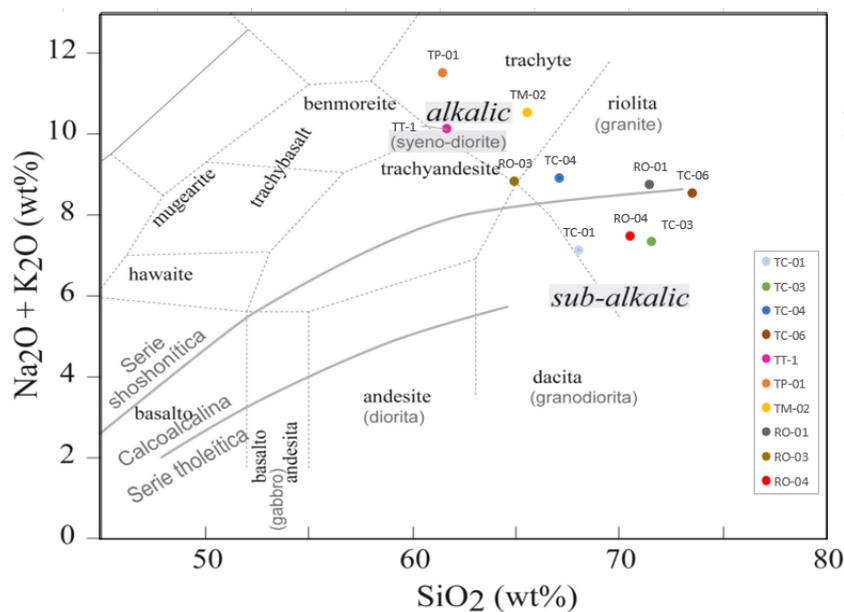
Zona	Ubicación	Código	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
CARAMOLLE I	Medio	TC-01	2,73	3,01	11,7	68,09	0	1,08	4,41	2,9	1,29	4,79
	Medio	TC-03	3,33	1,06	12,33	71,64	0,63	1,7	4,04	1,86	0,66	2,75
	Base	TC-04	5,16	0,98	13,81	67,18	0,67	3,13	3,77	2,08	0,91	2,31
CARAMOLLE II	Medio	TC-06	4,92	0,57	10,81	73,56	0,36	1,85	3,63	1,67	0,43	2,2
CARRETERA TARATA	Techo	TT-01	5,85	0,26	14,67	61,78	4,87	2,24	4,29	4,03	0,56	1,45
CARRETERA PANAMERICANA	Techo	TP-01	9,31	0,87	7,14	61,55	8,46	6,28	2,22	3,4		0,77
	Medio	TP-02	21,04	0,27	10,37	44,86	1,56	16,52	2,45	1,6		1,33
TROCHA MAGOLLO	Medio	TM-02	6,71	0,6	14,28	65,63	0,83	4,14	3,83	2,14	0,43	1,41
CARRETERA TARATA KM 17	Medio - I	RO-01	4,78	1	11,7	71,52	1,33	2,59	4	1,55	0,32	1,21
TROCHA CUARTEL TARAPACA	Medio	RO-03	4,31	0,9	15,18	65,01	1,12	1,63	4,54	3,12	0,98	3,21
		RO-04	4,04	0,82	14,13	70,56	1,06	0,67	3,44	2,31	0,69	2,28

Nota. Elaboración propia.

Estos porcentajes son traspuestos al diagrama TAS, donde se puede obtener que las rocas de composición Riolítica son las muestras: TC-01, TC-03, TC-04, TC-06, RO-01 y RO-04. Y las rocas de composición Traquítica son las muestras: TP-01, TT-01 y TM-02. Ver Figura 7.

Figura 7

Diagrama TAS (Total Alkalís vs. Silica)



Nota. Fuente (Le Maitre et al., 2002) imagen tomada de NASA

En la Tabla 5, se muestran los resultados obtenidos de las 20 muestras realizadas en 07 columnas estratigráficas con la finalidad de obtener las propiedades físicas de los contactos y zona medio de la Fm.

Huaylillas Superior.

Tabla 5
Resultados de ensayos de propiedades Físicas

Ítem	Ubicación	Código	Relación de vacíos	Porosidad (%)	Densidad (gr/cm ³)			Peso Específico Aparente	Absorción (%)
					Seca	Saturada	Sumergida		
		Rango normal	0,001-0,25	0,1-20	1,8-3,0	-			
1	Medio	TC-01	0,09	8,45	1,99	2,08	1,08	2,18	4,25
2	Medio	TC-02	0,12	10,69	2,17	2,27	1,27	2,43	4,94
3	Medio	TC-03	0,11	9,98	2,16	2,26	1,26	2,40	4,63
4	Base	TC-04	0,16	14,15	1,81	1,95	0,95	2,11	7,83
5	Medio	TC-05	0,05	5,07	1,91	1,96	0,96	2,01	2,66
6	Medio	TC-06	0,11	9,90	2,18	2,28	1,28	2,42	4,53
7	Medio	TC-07	0,06	5,27	2,25	2,31	1,31	2,38	2,34
8	Base	TC-08	0,28	21,97	1,65	1,87	0,87	2,11	13,32
9	Techo	TT-01	0,48	32,43	1,59	1,92	0,92	2,36	20,38
10	Medio	TT-02	0,28	21,63	1,91	2,13	1,13	2,44	11,31
11	Techo	TP-01	0,40	28,64	1,53	1,82	0,82	2,15	18,72
12	Medio	TP-02	0,22	17,96	1,96	2,13	1,13	2,38	9,19
13	Techo	TM-01	0,28	22,07	1,69	1,91	0,91	2,17	13,08
14	Medio	TM-02	0,28	22,00	1,95	2,13	1,16	2,37	8,90
15	Medio-I	RO-01	0,34	25,56	1,82	2,08	1,08	2,45	14,01
16	Medio-I	RO-02	0,37	27,08	1,69	1,96	0,96	2,31	16,06
17	Medio	RO-03	0,19	15,24	2,03	2,18	1,18	2,39	7,52
18	Medio	RO-04	0,08	7,30	2,26	2,33	1,33	2,44	3,23
19	Medio	RO-05	0,02	1,63	2,22	2,23	1,23	2,26	0,73
20	Base	RO-06	0,29	22,26	1,61	1,84	0,84	2,07	13,80

Según Adnan A. et al. (2017) Engineering Properties of Volcanic Tuff from the Western Part of Yemen, la porosidad tiene un rango de 0,1-20%, la densidad seca tiene un rango de 1,8-3,0% y la relación de vacíos está entre 0,001-0,25. Otra referencia es brindada por Gonzales de Vallejo, (2002) Ingeniería Geológica, donde menciona que el rango de porosidad para una roca ornamental es de 15-30%. Tomando como referencia lo mencionado las zonas mayormente de la parte media presentan una porosidad menor a 20% mientras que las que se encuentran en los contactos superiores e inferiores presentan porosidad mayor al 20%, adicionalmente se tiene que las muestras TT-01, TM-02, RO-01 y RO-02, también presentan porosidad mayor a 20 a pesar de que son muestras obtenidas en la zona medio de la Fm. Huaylillas Superior.

En la Tabla 6, se muestran los resultados obtenidos de las 20 muestras realizadas en 07 columnas estratigráficas con la finalidad de obtener las propiedades mecánicas de los contactos y zona medio de la Fm. Huaylillas Superior. Según McNall (2003) para las rocas ornamentales la resistencia a la compresión uniaxial debe ser mayor a 10 Mpa. Todas las muestras superan el rango indicado por McNall a excepción de la muestra TT-01, también es apreciable ver que la resistencia incrementa al acercarse al contacto inferior y decrece al estar cerca del contacto superior.

Tabla 6

Resultado de ensayo de carga puntual y prueba de resistencia de compresión Uniaxial.

Ítem	Zona	Ubicación	Código	Resistencia a la compresión Uniaxial UCS (MPa)		Promedio de la Resistencia en carga puntual (MPa)
				Rango normal	>10 MPa	
1	Caramolle I	Medio	TC-01	21,21		71,97
2		Medio	TC-02	58,45		109,62
3		Medio	TC-03	51,89		98,15
4		Base	TC-04	27,54		55,61
5		Medio	TC-05	24,19		60,69
6	Caramolle II	Medio	TC-06	29,80		89,21
7		Medio	TC-07	89,83		119,35
8		Base	TC-08	24,11		30,02
9	Carretera Tarata	Techo	TT-01	7,98		21,31
10		Medio	TT-02	26,78		57,56
11	Carretera	Techo	TP-01	12,27		16,90
12	Panamericana	Medio	TP-02	41,26		66,64
13	Trocha Magollo	Techo	TM-01	19,56		47,86
14		Medio	TM-02	36,74		65,91
15	Carretera Tarata	Medio - I	RO-01	59,45		48,96
16	km 17	Medio - I	RO-02	61,15		24,24
17	Trocha Tarapacá	Medio	RO-03	69,58		80,19
18		Medio	RO-04	91,45		130,26
19		Medio	RO-05	74,82		84,59
20		Base	RO-06	14,25		24,50

Nota. Donde M-I, viene a ser la F. Huaylillas superior parte media con intemperismo. INGESERVICIOS y Yauricocha (2022)

En la Tabla 7, se observa los resultados obtenidos al realizar la prueba de durabilidad por Sulfato de Magnesio en 10 muestras.

Figura 8

Comparación de muestra TC-01 (Ciclo 2 – Ciclo 5)



Figura 9

Comparación de muestra TP-01 (Ciclo 2 – Ciclo 5)

**Tabla 7**

Cuadro comparativo de porosidad y durabilidad por Sulfato de Magnesio

Zona de Cantera	Ubicación	Código	Porosidad (%)	Variación de Masa (%)	Variación de Volumen (*)	Cambio de color en la Matriz (*)	Afectación de minerales (*)	Desgaste en aristas (*)	Rotura o Disgregación (*)
CARAMOLLE I	Medio	TC-01	8,5	1,1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
	Medio	TC-02	10,7	-4,75	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Leve	Ninguno
	Medio	TC-03	9,9	-1,18	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
CARRETERA TARATA	Techo	TT-01	32,4	-15,45	Moderada	Ninguno	Oquedad/ Pómez disuelta	Moderado	Leve
	Medio	TT-02	21,6	-17,29	Leve a Moderada	Ninguno	Oquedad/ Pómez disuelta	Leve a Moderado	Leve
CARRETERA PANAMERICANA	Techo	TP-01	28,6	-3,94	Alta	Amarillo	Sanidina alterada	Alta	Alta
	Medio	TP-02	17,9	-8,39	Leve	Ninguno	Ninguno	Leve	Ninguno
TROCHA MAGOLLO	Techo	TM-01	22,0	-5,48	Moderado-Alto	Ninguno	Sanidina alterada	Moderado-Alto	Moderado
	Medio	TM-02	22,0	-5,93	Moderado-Alto	Ninguno	Sanidina alterada	Moderado-Alto	Moderado a Alto
CARRETERA TARATA KM 17	Medio – I,	RO-01	15,2	-11,06	Leve a Moderada	Beige	Ninguno	Leve	Leve

Nota. Zonas posibles como canteras. *Elaboración Propia.*

*: Inspección directa/visual

I: Intemperizado

Ninguno

Moderado

Leve

Moderado-Alto/Alta

El ensayo de durabilidad tiene mucha relación con la porosidad, precisamente las muestras que presentan porosidad mayor a 20% (TT-01, TT-02, TP-01, TM-01 y TM-02) han sufrido mayor variación de volumen y desgaste en las aristas de las muestras cúbicas (ver Figura 9), en cambio las muestras (TC-01, TC-02, TC-03, TP-02 y RO-01) con porcentaje menor al 20% presentan mayor durabilidad y menor desgastes (ver Figura 8).

En la Tabla 8 se muestra los resultados obtenidos durante la clasificación geomecánica, donde se realizaron 22 estaciones geomecánicas en las zonas de interés cercano a la zona de Caramolle, carretera Tarata, carretera Panamericana y la trocha en el sector de Magollo, aplicando el método RMR de Bieniawski 1989 a través del método de línea de detalle. La clasificación geomecánica permite obtener el cartografiado geomecánico el cual muestra de forma espacial los tipos de rocas que son soportados por el mapeo geológico (ver Figura 9).

Tabla 8

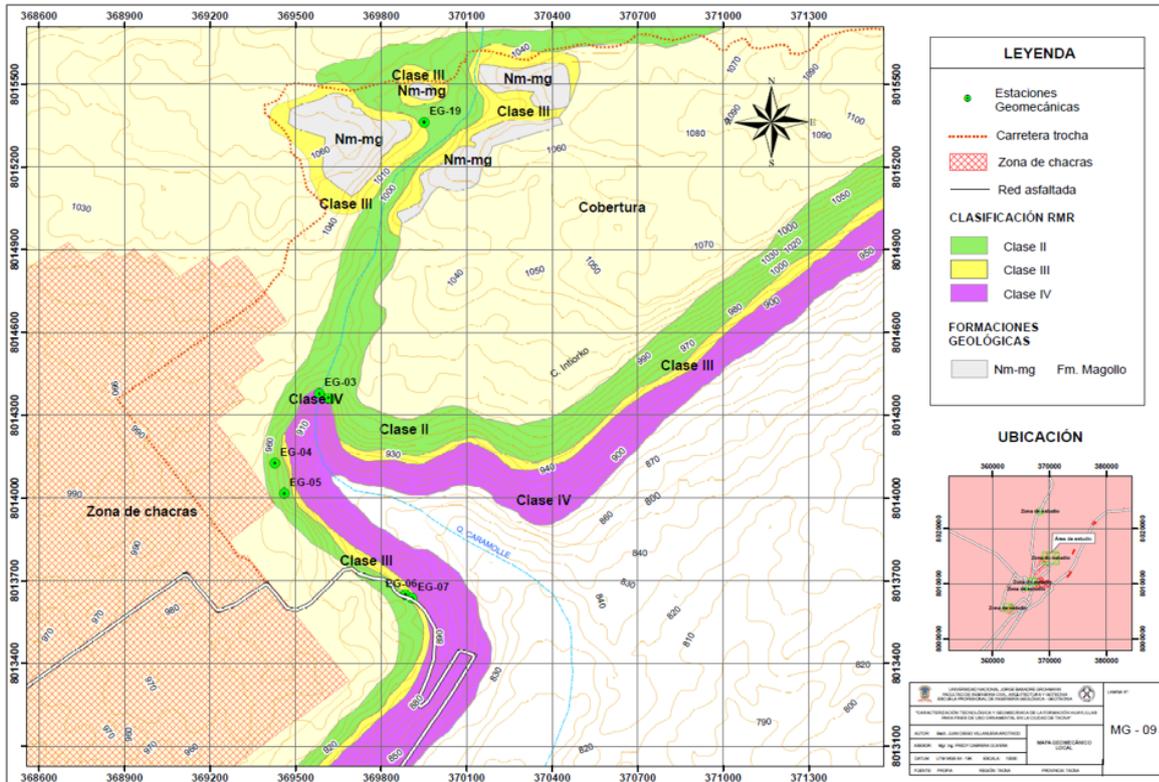
Clasificación geomecánica y ubicación espacial en la columna de la Fm. Huaylillas superior.

Zona	Ubicación	Cota (msnm)	Estación	Clasificación Geomecánica
CARAMOLLE I	Techo	970	EG-19	BUENA
	Medio	910	EG-04	BUENA
	Medio	890	EG-05	BUENA
	Medio	885	EG-01	BUENA
	Medio	882	EG-02	REGULAR
	Base	873	EG-03	MALA
CARAMOLLE II	Medio	860	EG-06	BUENA
	Base	859	EG-07	REGULAR
ACCESO A CARRETERA TARATA	Techo	716	EG-10A	REGULAR
	Medio	703	EG-10B	REGULAR
	Base	697	EG-10C	BUENA
CARRETERA TARATA KM 17	Techo	1138	EG-11	BUENA
	Techo	1138	EG-12	BUENA
CARRETERA PANAMERICANA	Techo	775	EG-17	MALA
	Medio	630	EG-15	REGULAR
	Medio	622	EG-16	BUENA
	Medio	610	EG-18A	REGULAR
	Base	607	EG-18B	MALA
TROCHA MAGOLLO	Techo	510	EG-08	REGULAR
	Techo	504	EG-09	REGULAR
	Medio	499	EG-13	BUENA
	Medio	494	EG-14	BUENA

Nota. Elaboración propia.

Se ha observado que a medida que nos acercamos a los contactos superior e inferior en el horizonte de la Formación Huaylillas Superior, se produce una degradación en las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. Esto resulta en una transición desde una clasificación de roca Buena a Regular, y en algunas áreas, la clasificación alcanza el tipo de roca Mala.

Figura 10
 Mapa Geomecánico Local, “Zona Caramolle”



Nota. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

En el área de estudio, se ha llevado a cabo el mapeo geológico, según Sánchez (2000) se considera a la formación Huaylillas con la presencia de 02 miembros el superior e inferior, lo cual se toma como modelo geológico para el registro de las características visuales y macroscópicas presentes en las quebradas y superficies del macizo rocoso, corroborando este modelo a través de la descripción y cartografiado detallado. Se ha logrado identificar las zonas de mayor interés, en una primera evaluación, se ha observado que, al este del área de estudio, específicamente en la zona de Viñani y la quebrada El Perdido, la formación Moquegua se encuentra ubicada a la altura del pie de la quebrada, lo cual dificulta el acceso a la cantera de la formación Huaylillas. Por lo tanto, se ha decidido descartar esta área y centrar el análisis en la zona oeste. Ver Figura 11.

Del mismo modo, en la zona sur se ha notado que la formación Huaylillas está más meteorizada y presenta una mayor concentración de sulfatos y sales en las fracturas, similar a lo observado en la zona del Autódromo y la quebrada Espíritu."

Para definir la calidad del afloramiento se ha realizado una caracterización tecnológica, el cual inició con el análisis petrográfico de las 11 muestras llevadas a laboratorio, donde se determinó la textura que poseen estas rocas, las cuales se observan en la Tabla 3, se evidencia que la textura perlítica predomina al estar cerca al contacto superior la formación Millo-Magollo relacionado con los grados variables de hidratación que aportó esta formación sedimentaria a la formación Huaylillas superior y en su contraparte

en el contacto inferior con la formación Huaylillas inferior presenta una textura Eutaxítica dominado por el incremento de fiammes aplastados por la columna del Huaylillas Superior con una potencia promedio de 60 m. Por lo tanto, según la homogeneidad, en la parte superior se tendría una roca Piroclástica de color rosáceo a beige con cristales de cuarzo menores a 2 mm y al descender se observa un cambio de color a rojizo intenso, aumento de fiammes en la matriz.

Para evaluar la aptitud de una roca ornamental para el uso determinado que se le dará, es preciso conocer sus características físicas, mecánicas y químicas más importantes (Ramírez y La Riva, 2001). Por lo que, se logra determinar las propiedades físicas de la Fm. Huaylillas Superior observándose que la porosidad juega un papel fundamental en la clasificación de afloramientos de calidad.

Adnan A. et al., 2. (2017) considera valores de porosidad aceptables entre 0.1-20% y Gonzales de Vallejo (2002) plantea valores aceptables entre 15-30%, según los valores encontrados se recomienda considerar el rango entre 0.1 a 20%, debido a que muestras que superan esta porosidad muestran mayor afectación en el ensayo de durabilidad por sulfatos de magnesio que otras muestras que no sufrieron mayor desgastes al tener una porosidad menor al 20%, a excepción de la muestra RO-01, la cual si sufrió afectación por el ensayo de durabilidad, pero es necesario recalcar que esta muestra presentaba acción de intemperismo, por lo que sus propiedades geomecánicas presenta un grado de afectación.

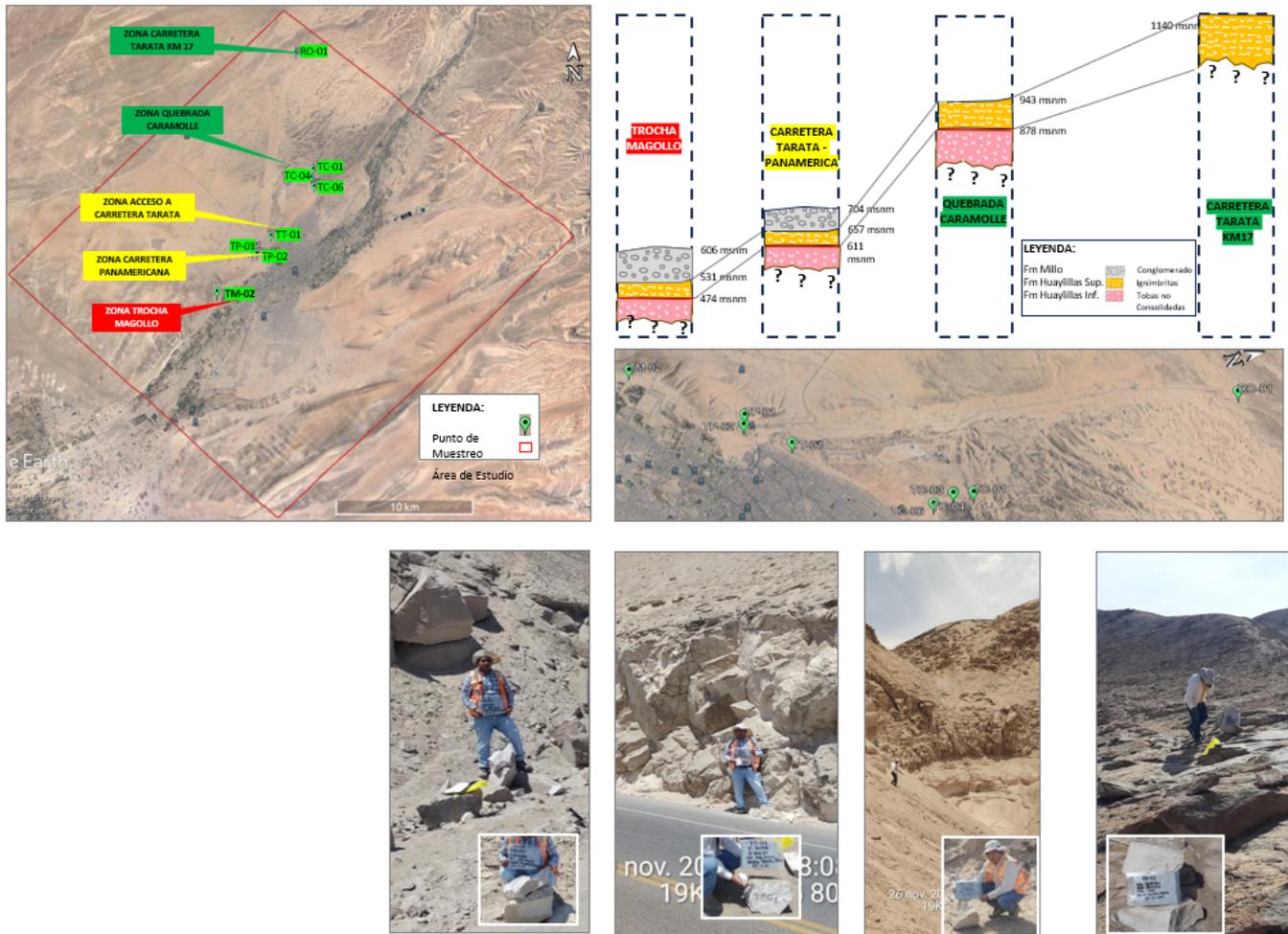
En el área de estudio, se ha observado una variación espacial en la durabilidad de las muestras de la Formación Huaylillas cuando se someten a pruebas de resistencia al sulfato de magnesio. Concretamente, se ha observado que la afectación es más pronunciada en la dirección sureste. Además, al analizar las secciones transversales, se ha determinado que la zona superior de la Formación Huaylillas muestra una menor durabilidad en comparación con la zona intermedia.

La densidad, peso específico y las propiedades mecánicas, se incrementan al acercarse al contacto inferior, lo que indica una compactación a gran escala en la zona inferior (Valdiviezo y Ramírez, 2009, pág. 303) y al estar cerca del contacto superior con la Formación Millo los valores descienden, debido a la aportación-hidratación.

La clasificación geomecánica se realiza en 22 estaciones según Bieniawski (1989), mediante el método de la línea de detalle, donde se tiene rocas de tipo Buena, Regular y Mala, controlado por los contactos superior e inferior, donde reduce su calidad de roca. Según Valdez (2019) en el cerro Intiorko donde también se tiene la formación Huaylillas Superior e Inferior clasifica a este macizo rocoso de calidad Buena y Regular.

Por lo tanto, después de revisar la disposición geológica y las características tecnológicas y clasificación geomecánica se tiene 05 posibles zonas como canteras ubicadas al Oeste del área de estudio, las cuales serán descritas para escoger la zona más óptima, según la accesibilidad, homogeneidad y calidad de la roca.

Figura 11
Ubicación de canteras evaluadas en el área de estudio



Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 9, se realiza la comparación de las 05 canteras mencionadas anteriormente, donde se puede observar que la zona de la carretera Tarata Km 17 y la quebrada Caramolle cumplen con la accesibilidad, homogeneidad y la calidad de roca, permite extraer bloques de regular tamaño idóneo para la fabricación de murales, esculturas entre otros. Mientras que las zonas ubicadas en la carretera Tarata, carretera Panamericana y trocha Magollo presentan caseríos y viviendas cercanos dificultando una posible extracción, además de tener la formación Millo en la parte superior generando un halo de alteración donde las características geomecánicas indican una roca de tipo Mala y la durabilidad muestra desgaste moderado a alto.

Tabla 9

Descripción de Canteras

Nro	Zona	Accesibilidad	Homogeneidad	Calidad de la Roca
1	Carretera Tarata Km17	A pocos metros de carretera Tarata, sin viviendas cercanas	Horizonte de la misma roca Huaylillas Superior.	<ul style="list-style-type: none"> • Afectación de la durabilidad leve. • Clasificación geomecánica: Buena • Espaciado entre discontinuidades: 1,1m-3,2m-0,9m y 0,3m.
2	Quebrada Caramolle	Parte alta, carretera asfaltada conectada a la carretera Tarata y el distrito de Ciudad Nueva. Parte baja por vía trocha 1,46 Km hacia la vía asfaltada. Terrenos cercados a un radio de 200 m.	Presenta la Fm. Huaylillas Superior e inferior. Se tiene horizontes con coloración rosáceo- beige a rojizo intenso.	<ul style="list-style-type: none"> • Afectación de la durabilidad leve. • Clasificación Geomecánica: Buena-Regular. • Espaciado entre discontinuidades: 2,2m-0,6m-1,4m y 3,5m.
3	Carretera Tarata	Se tiene como acceso principal la carretera misma. Caseríos y viviendas cercanas a menos de 50m.	Presenta la Fm. Huaylillas Superior e Inferior y la Fm. Millo. Se tiene horizontes con coloración blanquecino (radio de influencia de 15m aprox.), rosáceo- Beige a rojizo intenso (radio de influencia de 2-4m aprox.)	<ul style="list-style-type: none"> • Afectación de la durabilidad leve a moderada. • Clasificación geomecánica: Buena-Regular • Espaciado entre discontinuidades: 0,8m-1,5m y 2,8m.
4	Carretera Panamericana	Se tiene como acceso principal la carretera misma. Terrenos cercados y viviendas cercanas a menos de 100 m.		<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad leve a alta. • Clasificación geomecánica: mala-regular. • Espaciado entre discontinuidades: 0,46m-1,7m-1,8m y 2,0m.
5	Trocha Magollo			<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad moderada a alta. • Clasificación geomecánica: Buena-Regular. • Espaciado entre discontinuidades: 0,07m-0,30m-0,43m y 0,80m.

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 10 resume de manera integral todos los descubrimientos realizados, vinculando la caracterización tecnológica y la clasificación geomecánica, tomando en cuenta tanto las propiedades mecánicas como las

características de las fracturas. Es importante destacar que estos hallazgos están en correlación con los datos obtenidos en el análisis petrográfico, así como con las propiedades físicas (porosidad, absorción y peso específico) y los resultados de los ensayos de durabilidad.

Se ha observado que a medida que la roca se aproxima al contacto superior (Formación Millo-Magollo) e inferior (Formación Huaylillas Inferior), la clasificación de la roca cambia de buena o regular a mala.

Tabla 10

Cuadro comparativo de la caracterización Tecnológica y geomecánica de la formación Huaylillas

Zona	Ubicación	Código	Textura	Descripción Petrográfica	Porosidad	Peso Específico	Compresión	Durabilidad	Clasificación Geomecánica
CARA-MOLLE I	Medio	TC-01	Vitrofidica	Toba	8,45	2,18	21,21	Leve	Buena
	Medio	TC-02		Consolidado	10,69	2,43	58,45	Leve	Buena
	Base	TC-03	Vitrofidica y parcialmente Eutaxítica		9,98	2,40	51,89	Leve	Regular
CARRETERA TARATA KM 17	Medio - I	RO-01	Vitrofidica y parcialmente Perlítica	Toba Consolidado	25,56	2,45	59,45	Leve	Buena
CARRETERA TARATA	Techo	TT-01	Vitrofidica y Perlítica		32,43	2,36	7,98	Moderada	Regular
	Medio	TT-02			21,63	2,44	26,78	Leve a moderada	Buena
CARRETERA PANAMERICANA	Techo	TP-01		Toba	28,64	2,15	12,27	Alta	Mala
	Medio	TP-02	Vitrofidica y parcialmente Eutaxítica	Consolidado	17,96	2,38	41,26	Leve	Regular
TROCHA MAGOLLO	Techo	TM-01			22,07	2,17	19,56	Moderado a Alto	Regular
	Medio	TM-02	Vitrofidica		22,00	2,37	36,74	Moderado a Alto	Buena

Nota. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se determinaron las características de la formación Huaylillas en la zona de estudio para su uso ornamental. Solo el miembro superior de la formación es adecuado para trabajos ornamentales. Según el mapeo geológico-geomorfológico la formación Huaylillas son considerados una tobas consolidadas o soldadas "Ignimbritas" como área de interés en la zona alta – media y en la zona baja el Huaylillas Inferior es una toba no consolidada.

Se realizaron 22 estaciones geomecánicas para obtener una caracterización, revelando que el miembro inferior del Huaylillas es una roca Mala y el miembro superior es una roca buena a regular, donde se observa que al acercarse a la Fm. Millo o al contacto con el Huaylillas Inferior la roca desciende su calidad RMR. Las propiedades físicas y mecánicas se realizaron en 20 muestras pertenecientes a la Fm. Huaylillas de diferentes zonas donde los valores de porosidad (1,6 a 32,4%), la densidad seca (1,5 a 2,3 gr/cm³), la absorción (0,7 a 20,4%) y el peso específico (2 a 2,5 gr/cm³). Los valores de resistencia a la compresión uniaxial (7,98 a 91,45 Mpa). Los ensayos de durabilidad están correlacionados a las propiedades físicas y mecánicas obtenidas.

Según el análisis petrográfico, se tiene tobas consolidadas con litología vitroclastolítica con textura Vitrofídica, Eutaxítica y Perlítica de composición riolítica a traquítica.

Los usos posibles que se les pueda dar a la roca Huaylillas tomando en cuenta la caracterización realizada, puede ser para revestimiento interior y exterior de fachadas en obras arquitectónicas (Porosidad-Durabilidad), para pavimentos-Pisos de alto tránsito (Rojizo).

Esta investigación concluye que el miembro inferior es de mala calidad y el miembro superior de la Fm. Huaylillas es de mejor calidad considerando el halo de alteración (15 a 20 m.) de los contactos de la Fm. Millo y la Fm. Huaylillas Inferior. Se ubican 02 zonas como canteras ubicadas en la quebrada Caramolle y en la quebrada cercana al Km 17 de carretera Tarata.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por fondos del canon Sobre canon y regalías mineras en la convocatoria del 2020-I de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

REFERENCIAS

- Adnan A. et al., 2. (2017). *Engineering Properties of Volcanic Tuff from the Western Part of Yemen*. <https://doi.org/10.24200/squjs.vol22iss2pp81-88>
- Alberto Pool Ramírez & Juan La Riva Sánchez. (2001). *Rocas ornamentales en el Perú*. *BOLETÍN N° 9 Serie B: Geología Económica*, 26-32. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/236>
- Alejandra Díaz Valdiviezo & José Ramírez Carrión. (2009). *Compendio de rocas y minerales industriales en el Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/224>
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley.

- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación. Madrid, España.
- Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks a Classification and Glossary of Terms Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Sub-Commission on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press, 236 p.
- McNall, G. (2003). *Soil and Rock Construction Materials*. Taylor and Francis e-library.
- Morales Cabrera, D., Rodríguez Copare, J., & Machaca Mamani, E. (2019). *Potencial de las rocas ornamentales en las regiones Tacna y Moquegua*. CIENCIA & DESARROLLO. <https://doi.org/10.33326/26176033.2013.15.326>
- Sánchez Fernández, Agapito Wilfredo; Rosell Solís, Walter; Raymundo Salgado, Tito. (2000). *Memoria explicativa de la revisión geológica en los cuadrángulos de Punta Bombón (35-s), Clemesí (35-t), Ilo (36-t), Locumba(36-u), La Yarada (37-u), Tacna(37-v), Huaylillas (37-x), Juli (33-y), Pizacoma (34-y) e Isla Anápiá (33-z) [Escala 1:100 000]*. Instituto Geológico Minero Metalúrgico., Dirección de Geología Regional. Lima: Instituto Geológico Minero Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2047>
- Valdez, P. A. (2019). *Caracterización Geomecánica de las Ignimbritas de la formación Huaylillas del cerro Intiorko, con fines de cimentación (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9837>