

Estudio de la correlación entre la resistencia a la compresión uniaxial y la velocidad de ondas P en arenisca

Study of the correlation between uniaxial compressive strength and P-wave velocity in sandstone

Fecha de envío: 24 de marzo 2022

Fecha de aceptación: 28 de septiembre 2022

Sergio Villalobos-Cifuentes¹, Mauro Muñoz-Menéndez² e Ignacio Pérez-Rey³

¹ BECHTEL G&HES - Mining & Metals, Ingeniería Geotécnica e Hidráulica, Av. Apoquindo 3885, Las Condes RM, Chile, savillal@bechtel.com

² CEDEX - Laboratorio de Geotecnia, C. Alfonso XII 3, 28014, Madrid, España, mauro.muniz@cedex.es

³ GESSMin - CINTECX, Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad de Vigo, España, iperez@uvigo.es

La resistencia geomecánica de macizos rocosos juega un rol clave en la planificación y el diseño de proyectos de construcción civil y minera. La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de las rocas es una propiedad crucial que se utiliza ampliamente en ingeniería geotécnica para comprender la resistencia y deformabilidad de macizos rocosos. La determinación de las propiedades geomecánicas tanto en el campo como en el laboratorio requiere mucho tiempo, es tediosa y costosa. Sin embargo, las técnicas ultrasónicas, como la medición de la velocidad de propagación de las ondas P (V_p), son un método simple, rentable y no destructivo para evaluar la UCS de las rocas. En este estudio se desarrolla una revisión del estado del conocimiento del tipo de correlaciones empíricas que existen para areniscas para predecir el valor de UCS a partir de V_p . El principal objetivo desarrollado es un meta estudio sobre la relación entre UCS y V_p . Para esto son recopilados desde diversas fuentes los datos de UCS y V_p para roca sedimentaria tipo arenisca. Con los resultados obtenidos se proponen fórmulas empíricas que correlacionan UCS y V_p , las que pueden ser usadas como una herramienta de ingeniería geotécnica para predecir el valor de UCS a partir de V_p en areniscas.

Palabras clave: UCS, V_p , arenisca, técnica ultrasónica, correlación estadística

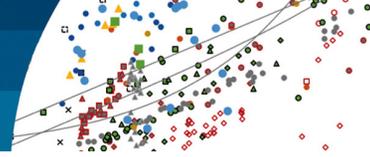
The geomechanical strength of rock masses plays a key role in the planning and design of civil and mining construction projects. The uniaxial compressive strength (UCS) of rocks is a crucial property that is widely used in geotechnical engineering to understand the strength and deformability of rock masses. Determination of geomechanical properties both in the field and in the laboratory is time consuming, tedious, and expensive. However, ultrasonic techniques, such as P-wave propagation velocity (V_p) measurement, are a simple, cost-effective, and non-destructive method for evaluating the UCS of rocks. In this study, a review of the state of knowledge of the type of empirical correlations that exist for sandstones to predict the value of UCS from V_p is developed. The main objective developed is a meta-study on the relationship between UCS and V_p . For this, UCS and V_p data for sandstone-type sedimentary rock are compiled from various sources. With the results obtained, empirical formulas are proposed that correlate UCS and V_p , which can be used as a geotechnical engineering tool to predict the value of UCS from V_p in sandstones.

Keywords: USC, V_p , sandstone, ultrasonic technique, statistical correlation

Introducción

Aproximadamente el 66% de las rocas expuestas en la corteza terrestre son sedimentarias (Blatt y Jones, 1975). En las disciplinas de mecánica e ingeniería de rocas, la arenisca es una de las rocas más estudiadas, esto se debe

a que de forma cotidiana este tipo de roca se encuentra en diversas aplicaciones de ingeniería geotécnica. Por ejemplo, en la minería del carbón, la arenisca es un componente común del techo y el piso de las vetas de carbón. En la ingeniería de reservorios de petróleo y gas,



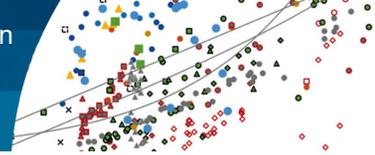
también se encuentran con mayor frecuencia la arenisca como macizo rocoso anfitrión. En proyectos de ingeniería de carreteras es común encontrar afloramientos de macizo rocoso de arenisca, como terreno de cimentación de puentes o viaductos, también excavaciones de taludes y/o túneles. Por lo tanto, un estudio del comportamiento mecánico de la roca sedimentaria tipo arenisca, en general, es de gran importancia para resolver problemas particulares de ingeniería geotécnica. La estimación de las propiedades geomecánicas de las rocas en laboratorio, como es el caso de la resistencia a la compresión simple (*UCS*), entre otras, en muchos casos es difícil y costosa. Por lo tanto, la posibilidad de correlacionar el parámetro *UCS* con un parámetro más simple de estimar en laboratorio, en este caso la velocidad de propagación de las ondas de compresión V_p , se vuelve una alternativa práctica y útil en la ingeniería geotécnica.

Los proyectos de ingeniería geotécnica, relacionados con las industrias de la excavación de túneles y la minería, son esenciales para satisfacer la creciente demanda de la sociedad de facilitar los viajes y el uso de los recursos. Esta creciente demanda ha llevado a que los proyectos se construyan en entornos cada vez más difíciles, con alcances más amplios y complejidad cada vez mayor. Esta complejidad ha creado la necesidad de métodos de caracterización y clasificación de macizos rocosos mejores y más precisos, para garantizar la seguridad y el éxito de estos grandes proyectos. El proceso de investigación del terreno para estos proyectos de ingeniería incluye varios métodos diferentes para caracterizar macizos rocosos. En las etapas de diseño preliminar y detallado de un proyecto, los programas de perforación y los ensayos de terreno (carga puntual, velocidad de ondas, ensayos de durabilidad) se utilizan para examinar las condiciones de la roca in situ y estimar las propiedades del material. Estos métodos proporcionan una comprensión preliminar del macizo rocoso, pero generalmente requieren ensayos de laboratorio adicionales para medir las propiedades geomecánicas que son esenciales para el diseño de ingeniería de rocas. Las propiedades geomecánicas adquiridas de estos ensayos de laboratorio se utilizan como datos de entrada para soluciones analíticas, métodos empíricos y modelos numéricos para predecir el comportamiento del terreno. Dado que estos métodos de diseño requieren datos de entrada confiables y precisos, la estimación inexacta de

las propiedades del material puede conducir a un diseño insuficiente o excesivo del soporte de excavación, lo que en última instancia puede resultar en condiciones inseguras/inestables o sobrecostos del proyecto. El aumento de la confiabilidad y precisión de los resultados de las pruebas de laboratorio geomecánicas permite un mayor nivel de confianza en el diseño, la seguridad y el análisis de los costos de proyectos de construcción.

El ensayo de laboratorio más utilizado comúnmente para estimar la resistencia y deformabilidad de la roca es el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial (*UCS*), que se realiza utilizando un marco de carga rígido que aplica una fuerza de compresión que aumenta monótonamente a un testigo de roca previamente preparado. Este ensayo se utiliza generalmente para investigar el *UCS* y las propiedades elásticas de la roca intacta; sin embargo, según la selección de la muestra, también pueden incluir parte de la estructura del macizo rocoso. La industria y la investigación se basan en los ensayos *UCS* para determinar la resistencia y deformabilidad de la roca al proporcionar propiedades geomecánicas como *UCS*, módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν). Para adquirir las propiedades elásticas, se requiere la medición de la respuesta a la deformación de los testigos de ensayos *UCS*. Según la norma ASTM D7012 (2014), el método estándar para medir la deformación de la muestra *UCS* es con dispositivos de medición de deformación discretos, como extensómetros o galgas extensométricas eléctricas. Sin embargo, el método estándar limita en última instancia la resolución espacial de la medición de deformación y es incapaz de capturar la distribución de deformación en una muestra durante el ensayo *UCS*.

Lo descrito anteriormente nos hace entender que la estimación de las propiedades geomecánicas de la roca es de vital importancia para proyectos geotécnicos. Además, la estimación de las propiedades geomecánicas de la roca mediante ensayos de laboratorio de resistencia estandarizados es un proceso que demanda importantes recursos económicos y tiempo. Por lo tanto, las ecuaciones empíricas que estiman una correlación estadística de la resistencia de la roca con otro parámetro se vuelven una herramienta práctica y confiable que puede ser utilizada para la predicción de *UCS* a partir del valor de V_p . Lo anterior hace que el presente estudio se vuelva muy significativo e importante.



El presente trabajo ha sido desarrollado con la finalidad de alcanzar los siguientes objetivos:

Revisar el estado del conocimiento de las correlaciones empíricas propuestas para estimar el valor de UCS a partir de V_p en roca sedimentaria tipo arenisca.

Desarrollar un análisis estadístico de datos recolectados de la literatura técnica, correspondientes a valores de UCS y V_p para roca sedimentaria tipo arenisca.

Proponer y validar una ecuación empírica que correlacione el valor de UCS a partir de V_p para roca sedimentaria tipo arenisca.

Se estudian las técnicas de transmisión de pulsos de ultrasonido y se desarrolla un breve resumen de estudios previos que correlacionan el valor de UCS con V_p . Posteriormente, se desarrolla un análisis estadístico de los datos de UCS y V_p recolectados de la literatura técnica, proponiendo tres fórmulas empíricas que correlacionan el valor de UCS con V_p para arenisca. Además, se valida el desempeño de las fórmulas empíricas comparando los valores entre estas. Finalmente, se plantea un análisis de la correlación entre UCS y V_p para arenisca.

Correlación entre UCS y V_p para arenisca

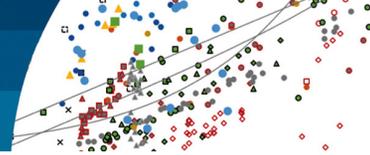
Para el desarrollo seguro de la infraestructura civil, minera, o de distinta índole, la evaluación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso es de primordial importancia. Tanto el comportamiento como el desempeño de las rocas se rigen por sus propiedades mecánicas, que son fuente de información crítica para diseñar proyectos de ingeniería geomecánica. La obtención de estos parámetros usando métodos directos (destructivos, in situ o en laboratorio), en general son de alto costo económico, requieren de mucho tiempo de ejecución y mano de obra experta, lo que algunas veces, es difícil de implementar (Hoek y Diederichs, 2006). Por lo tanto, la estimación indirecta de los parámetros de la roca a través de técnicas de correlación es un enfoque simple y que puede ser confiable en varios ámbitos de la ingeniería de rocas. La correlación de las propiedades geomecánicas de las rocas con la velocidad de las ondas P (V_p) es de gran interés en mecánica de rocas y en ingeniería geotécnica, y por ello, se ha popularizado debido a su fácil implementación. La medición de V_p es un tipo de ensayo no destructivo, económico y fácil de realizar tanto en el laboratorio como en condiciones de campo.

La resistencia a la compresión uniaxial UCS es el parámetro más significativo utilizado para caracterizar la roca intacta en muchos proyectos de ingeniería geotécnica. Además, UCS es uno de los parámetros básicos que se utilizan en dichos proyectos como dato de entrada para sistemas de clasificación de macizos rocosos y en los criterios de rotura de rocas. La medición directa del valor de UCS de las rocas requiere testigos intactos con una calidad y geometría específica. Además, es relativamente costoso y requiere mucho tiempo determinar aplicando las normas ISRM (1981) o ASTM D7012 (2014). No siempre se pueden extraer testigos lisos y perfectamente paralelos en algunos tipos de rocas (erosionadas, fracturadas, blandas, foliadas). Por estas razones, una estimación predictiva del valor de UCS a partir de ensayos simples (no destructivos) es económica y fácil. Hay muchos estudios donde las ecuaciones de predicción se derivan de técnicas de regresión simple y regresión múltiple. Recientemente, además de los métodos tradicionales como las técnicas de regresión simple o múltiple utilizadas para crear modelos de predicción en ingeniería de rocas, nuevas técnicas como árboles de regresión, sistema de inferencia neurodifuso adaptativo (ANFIS), red neuronal artificial (ANN) y programación de expresión genética (GEP) se han utilizado para estimar predictivamente las propiedades mecánicas de rocas (Kahraman, 2007; Baykasoglu *et al.*, 2008; Gokceoglu *et al.*, 2009; Tiryaki, 2008; Yilmaz, 2009; Dehghan *et al.*, 2010; Monjezi *et al.*, 2012; Mishra y Basu, 2013; Armaghani *et al.*, 2016).

Técnicas de transmisión de pulsos de ultrasonido

A continuación, es descrita la metodología recomendada por Aydin (2014) para ensayos de laboratorio mediante técnicas de pulsos de ultrasonido. Los ensayos de ultrasonido son uno de los métodos no destructivos más utilizados para la caracterización de materiales rocosos. Este método se basa en la generación, transmisión y recepción de trenes de ondas de pequeña (o baja) amplitud de longitud de pulso ajustable y frecuencias de pulso ultrasónico.

La propagación de ondas se puede considerar como transferencia o paso de energía de deformación a través de un medio. En los ensayos de materiales rutinarios, las características microestructurales del medio (que abarcan la mineralogía, el tamaño y la distribución de la forma de los



huecos y granos y sus disposiciones relativas), determinan la velocidad de disipación de energía, modifican de manera única el espectro de frecuencias y definen las velocidades de los diferentes modos de propagación, por ejemplo, compresivo y cortante. Por lo tanto, las velocidades de onda y sus espectros de amplitud-frecuencia están relacionados con las propiedades mecánicas del material, que a la vez también están fuertemente relacionadas con las características microestructurales. Esta relación constituye la base de los ensayos de ultrasonido, pero también plantea grandes desafíos para mejorar su precisión y ofrece oportunidades para una gama más amplia de aplicaciones.

Los métodos sugeridos originalmente (ISRM, 2007) consisten en tres enfoques diferentes para la determinación en laboratorio de la velocidad del sonido. Estos enfoques utilizan ondas generadas en diferentes rangos de frecuencia y requieren diferentes formas de muestras, procedimientos de ensayo y análisis. Aydin (2014) sugiere un método actualizado que cubre los dos primeros enfoques, las llamadas técnicas de pulso ultrasónico de frecuencia alta (100 kHz - 2 MHz) y baja (2 - 30 kHz), mientras que el enfoque resonante se presenta en un método sugerido complementario. Esta actualización:

- a. unifica los dos enfoques ultrasónicos mediante un esquema generalizado aplicable a cualquier forma/tamaño de testigo en cualquier frecuencia dentro del rango ultrasónico (> 20 kHz),
- b. enfatiza las peculiaridades y detalles de las rocas como materiales de ensayos ultrasónicos, y
- c. sugiere posibles modificaciones/ajustes en los procedimientos de ensayo y preparación del testigo para tener en consideración las características microestructurales especiales que se encuentran en los tipos de rocas comunes.

En el método de pulsos de ensayo ultrasónico, la generación de trenes de ondas sonoras y la detección de su propagación a través de sólidos se puede lograr con un solo transductor (técnica de pulso-eco) o con un par de transductores (técnica de captura de tono). La técnica de pulso-eco está diseñada para localizar defectos que forman contrastes de impedancia sísmica dentro del material anfitrión. La técnica de captura de tono se puede utilizar en tres configuraciones diferentes de pares de transductores dependiendo de la accesibilidad de las superficies de

ensayo (Figuras 1(a)-1(c)). Este método se concentra en la configuración de transmisión directa de la técnica de captura de tono. La configuración de transmisión directa se prefiere a las demás porque la dirección y la longitud de la trayectoria a lo largo de la cual viaja el frente de onda se conocen con mayor certeza y los resultados del ensayo no se ven influenciados por posibles daños o deterioro de la superficie o bordes del testigo.

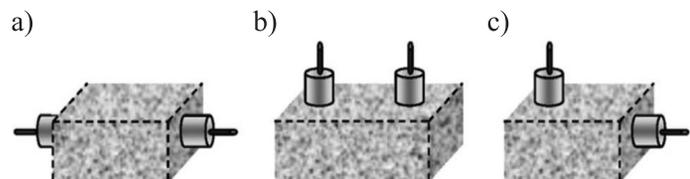
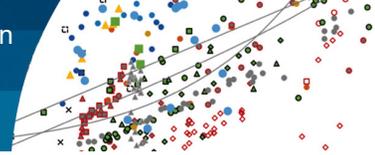


Figura 1: Configuraciones básicas de pares de transductores (transmisor-receptor) utilizados en la técnica de captura de tono (*pitch-catch*): (a) transmisión directa (pasante), (b) transmisión indirecta (superficial) y (c) transmisión semidirecta (borde) (Aydin, 2014)

La velocidad ultrasónica de la onda P (V_P) y la velocidad de la onda S (V_S) se utilizan habitualmente para establecer correlaciones predictivas (principalmente con la porosidad, la resistencia y el módulo estático) y para determinar las constantes elásticas dinámicas. El sistema de ensayo ultrasónico como herramienta no destructiva también puede usarse de manera rutinaria para examinar la uniformidad/integridad y anisotropía de otros testigos de ensayo para reducir o explicar las dispersiones en los resultados de los ensayos de mecánica de rocas. Esta evaluación se puede realizar determinando la velocidad sobre un patrón de cuadrícula en superficies grandes o mediante el perfil de velocidad a lo largo de uno o más recorridos en superficies más estrechas. Los bloques rectangulares brindan una oportunidad para determinar los ejes principales de anisotropía de velocidad en testigos de roca con bandas, laminadas, foliadas, filíticas, esquistosas y orientadas similares que pueden impartir dependencias direccionales de la resistencia y la deformación. Los testigos cilíndricos orientados y las muestras en forma de esfera, cuando estén disponibles, también se pueden utilizar para este propósito.

Equipo y testigos

En la Figura 2 se muestra un diseño típico de los componentes esenciales del sistema de ensayo ultrasónico como guía preliminar. Estos componentes incluyen:



- un generador de señales para disparar un temporizador para marcar el comienzo de cada intervalo de pulso de excitación,
- un temporizador de llegada en forma de un disparador de umbral y/o un osciloscopio para el análisis visual de la forma de onda,
- amplificadores y filtros para mejorar la señal, y
- una unidad de adquisición de datos que interactúa con el aparato.

Se necesitan dos pares de transductores transmisor-receptor separados para la determinación de las velocidades de las ondas P y S. Cada par de transductores (piezoeléctricos) puede tener una frecuencia nominal entre 20 kHz y 2 MHz, pero por motivos prácticos se recomienda el rango de 50 a 500 kHz.

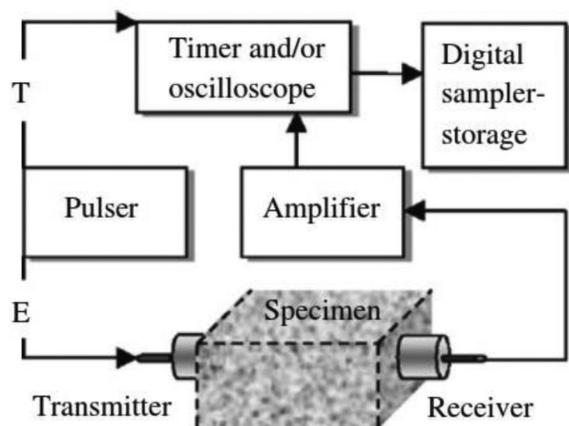


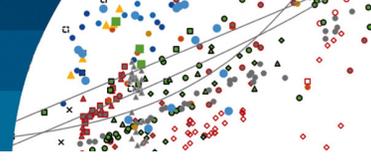
Figura 2: Un diseño simplificado de los componentes básicos de un equipo ultrasonido. Señal de excitación del transmisor E y señal de activación del temporizador T. Ref Aydin (2014)

Cuando se ensayan materiales rocosos, se debe recordar que las microestructuras in situ se alteran inevitablemente en diversos grados durante la recuperación, el transporte, el almacenamiento y la preparación, pero esto se puede minimizar utilizando las herramientas y procedimientos adecuados y ejerciendo cuidado en todas las etapas. La configuración del transductor de transmisión directa requiere testigos de ensayo con caras lisas (usando papel de lija fino), planas (especificadas por un tamaño de espacio máximo entre la superficie de la muestra y la regla estándar, que admite una galga de espesores de < 0.025 mm) y paralelas (< 1 mm /100 mm de la longitud de la trayectoria de viaje de la onda). Cada dimensión del testigo

debe medirse en varios puntos con una precisión de ± 0.01 mm.

Estudios previos

Se ha realizado una gran cantidad de investigaciones para estimar el valor de UCS a partir del valor de V_p en rocas sedimentarias tipo arenisca (ver Tabla 1). Kahraman (2001) propuso una correlación de potencia para predecir UCS usando V_p de 27 tipos de rocas diferentes, incluyendo areniscas. Chary *et al.* (2006) utilizaron testigos de arenisca de dos campos de carbón diferentes (SCCL y NLC), donde sugirieron ecuaciones de regresión por separado para SCCL y NLC, para predecir el UCS usando V_p . Cobanoglu y Celik (2008) utilizaron testigos de mortero de cemento, caliza y arenisca de diferente diámetro y propusieron una ecuación de correlación común para todos los tipos de materiales utilizados basada en conjuntos de diferentes diámetros. Kilic y Teymen (2008) propusieron una ecuación de regresión de potencia para predecir UCS de 10 tipos de rocas diferentes utilizando el valor de V_p . Khandelwal y Singh (2009) propusieron una ecuación de regresión para predecir UCS de 12 tipos de rocas diferentes utilizando el valor de V_p . Sharma y Singh (2008) sugirieron una ecuación de regresión simple para 49 muestras de 6 tipos de rocas diferentes. Moradian y Behnia (2009) utilizaron 64 muestras de margas, areniscas y calizas para producir una correlación simple entre UCS y V_p . Altindag (2012) realizó un análisis de regresión simple y múltiple para correlacionar el valor de UCS y V_p . Sarkar *et al.* (2012) utilizaron 94 muestras de 13 tipos de rocas y propusieron una correlación simple para todos los tipos de rocas. Khandelwal (2013) propuso una ecuación de regresión simple para 13 tipos de rocas diferentes (arenisca, caliza, esquisto, etc). Mishra y Basu (2013) sugirieron ecuaciones de regresión separadas para granito, esquisto y areniscas, debido a que no pudieron encontrar una correlación común para todos los tipos de rocas utilizados. Kurtulus *et al.* (2015) utilizaron 96 muestras de 3 tipos de rocas y propusieron correlaciones entre V_p y diferentes propiedades. Armaghani *et al.* (2016) propuso una correlación potencial para predecir UCS usando V_p de diferentes rocas, incluyendo areniscas. Selçuk y Nar (2016) utilizaron 42 muestras de 8 tipos de rocas para sugerir una ecuación de correlación entre UCS y V_p . Abdi *et al.* (2019) utilizaron 34 muestras de 6 tipos de arenisca con distintos grados de saturación



para sugerir una ecuación de correlación entre UCS y V_p . Uyanik *et al.* (2019) sugirieron una ecuación potencial para 13 tipos de rocas sedimentarias. Teymen y Menguc (2020) utilizaron 93 muestras de diferentes tipos de rocas, arenisca entre estas, y sugirieron una ecuación de regresión simple. Rahman *et al.* (2020) utilizaron areniscas y lutitas, y sugirieron ecuaciones de regresión separadas para los 2 tipos de rocas, recomendando que cada tipo de roca siga una curva de regresión característica. Rahman y Sarkar (2021) sugirieron ecuaciones de regresión potencial, separadas para distintos tipos de rocas, entre estas para arenisca, debido a que no pudieron encontrar una correlación común para todos los tipos de rocas utilizados.

Las ecuaciones de regresión obtenidas por los diferentes investigadores utilizados en este trabajo se han representado

y comparado en la Figura 3, lo que sugiere que no existe una ecuación de regresión común y confiable que pueda usarse para la predicción de UCS a partir de V_p .

En las técnicas de predicción empíricas, como es en este caso, de manera convencional, los datos experimentales se recopilan después de una serie de ensayos. Posteriormente, para describir la correlación entre los valores de UCS y V_p se utilizan métodos de regresión, pudiendo determinar las fórmulas empíricas. Respecto a las fórmulas empíricas señaladas en la Tabla 1 y graficadas en la Figura 3, se utilizaron diferentes tipos de ecuaciones, como funciones lineales, exponenciales, y de potencia, para realizar el ajuste de mínimos cuadrados. Es importante señalar que, en la mayoría de los casos, existe una relación no lineal entre UCS y V_p , por lo tanto, la relación entre el valor de

Tabla 1: Ecuaciones de regresión estadística propuestas por varios autores

Nº	Ecuación	R ²	Tipo de roca	Referencia
1	$UCS = V_p^{1.21}$	0.83	27 muestras de diferentes rocas	Kharaman (2001)
2	$UCS = 0.1564V_p - 692.41$ $UCS = 0.0144V_p - 24.856$	0.80 0.51	9 muestras de arenisca NLC 23 muestras de arenisca SCCL	Chary <i>et al.</i> (2006)
3	$UCS = 56.71V_p - 192.93$	0.67	150 muestras de diferentes rocas	Cobanoglu y Celik (2008)
4	$UCS = 2.304V_p^{2.4315}$	0.94	19 muestras de 10 tipos de rocas	Kilic y Teymen (2008)
5	$UCS = 0.0642V_p - 117.99$	0.90	49 muestras de diferentes rocas	Sharma y Singh (2008)
6	$UCS = 0.1333V_p - 227.19$	0.96	12 muestras de diferentes rocas	Khandelwal y Singh (2009)
7	$UCS = 165.05\exp[-4.451V_p]$	0.70	64 muestras de diferentes rocas	Moradian y Behnia (2009)
8	$UCS = 12.743V_p^{1.194}$	0.76	7 muestras de diferentes rocas	Altindag (2012)
9	$UCS = 0.039V_p - 50.01$	0.93	94 muestras de 13 tipos de rocas	Sarkar <i>et al.</i> (2012)
10	$UCS = 7.182V_p^{1.600}$	0.78	13 muestras de diferentes rocas	Karakul y Ulusay (2013)
11	$UCS = 0.033V_p - 34.83$	0.87	12 muestras de 6 tipos de rocas	Khandewal (2013)
12	$UCS = 0.05V_p - 126.4$	0.82	20 muestras de arenisca	Mishra y Basu (2013)
13	$UCS = 17.783V_p^{1.099}$	0.48	108 muestras de arenisca	Armaghani <i>et al.</i> (2016)
14	$UCS = 8 \times 10^{-6}V_p^2 - 0.024V_p + 31.92$	0.89	96 muestras de 6 tipos de rocas	Kurtulus <i>et al.</i> (2016)
15	$UCS = 22.189V_p - 30.32$	0.84	42 muestras de 8 tipos de rocas	Selcuk y Nar (2016)
16	$UCS = 14.64V_p^{1.742}$	0.64	6 muestras de arenisca	Abdi <i>et al.</i> (2019)
17	$UCS = 6.60V_p^{1.60}$	0.92	46 muestras de 13 tipos de rocas	Uyanik <i>et al.</i> (2019)
18	$UCS = 6.75V_p^{1.68}$	0.70	93 muestras de diferentes rocas	Teymen y Menguc (2020)
19	$UCS = 19.421V_p - 26.221$	0.98	39 muestras de arenisca	Rahman <i>et al.</i> (2020)
20	$UCS = 5.3211\exp[0.5745V_p]$ (a) $UCS = 8.1469\exp[0.4506V_p]$ (b)	0.66 0.57	Arenisca (37 estudios previos) Todo tipo de rocas	Rahman y Sarkar (2021)

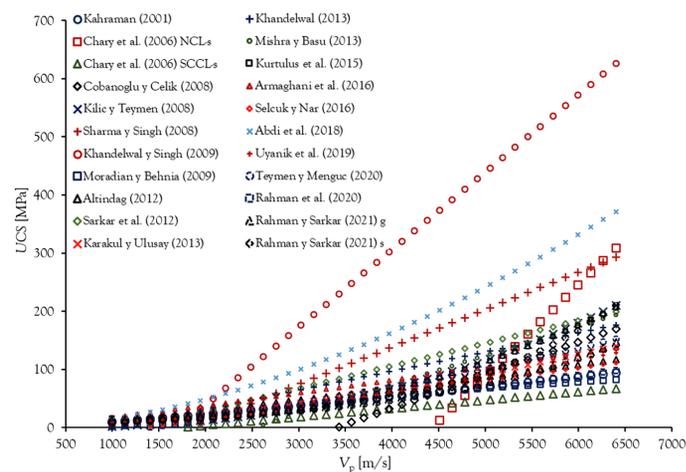
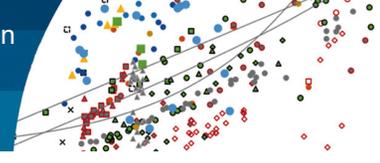


Figura 3: Ecuaciones de regresión estadística entre UCS y V_p

UCS y V_p no puede describirse simplemente mediante una única fórmula empírica.

La Figura 3 muestra la variabilidad de resultados que pueden ser obtenidos usando las fórmulas empíricas descritas anteriormente para estimar el valor de UCS en función de V_p . Con la fórmula lineal propuesta por Khandelwal y Singh (2009) se obtienen los mayores valores de UCS , y a la vez es la fórmula que posee uno de los coeficientes de correlación más altos ($R^2 = 0.96$). Sin embargo, esto puede ser atribuido a que el tamaño muestral evaluado estadísticamente es bajo, con tan sólo 12 muestras de diferentes tipos de rocas. Con la fórmula lineal propuesta por Chary *et al.* (2006) se obtienen los menores valores de UCS , y a la vez es la fórmula que posee uno de los coeficientes de correlación más bajos ($R^2 = 0.51$). Esto puede ser atribuido a que la dispersión de los datos evaluados estadísticamente es alta; por lo tanto, existe una baja correlación para ser aplicada en otros tipos de rocas. La fórmula lineal propuesta por Rahaman *et al.* (2020) es la que posee el coeficiente de correlación más alto ($R^2 = 0.98$), con la cual se obtienen valores en el rango medio de UCS . Esto puede ser atribuido a que para su desarrollo se utilizó una base de datos de 39 muestras sólo de areniscas. Por otro lado, de manera contraria, la fórmula potencial propuesta por Arghamani *et al.* (2016) es la que posee el coeficiente de correlación más bajo ($R^2 = 0.48$), con la cual también se obtienen valores en el rango medio de UCS . Esto puede ser atribuido, en primer lugar, a que, para su desarrollo existió una dispersión alta de los resultados de ensayos, y que se utilizó una base de datos de 108 muestras sólo de areniscas.

Efecto del grado de saturación

Varios investigadores han reportado en detalle la influencia del contenido de humedad w sobre la resistencia y deformabilidad de los tipos de rocas sedimentarias. Colback y Wild (1965) indicaron una pérdida del 50% de UCS de las condiciones secas a las saturadas, para litologías de lutitas y areniscas. Para areniscas cuarzosas, Burshtein (1969) observó que un aumento en w de 0 a 4% disminuyó el valor de UCS en un 50%, mientras que para la variedad rica en arcilla un aumento en w al 1.5% redujo el UCS a aproximadamente un tercio de su valor inicial. Priest y Selvakumar (1982) estudiaron dos areniscas y tres calizas, reportando una relación entre UCS y w para cada tipo de roca. Dyke y Dobereiner (1991) mostraron la variación de UCS con w para tres areniscas con una resistencia en condición seca de aproximadamente 34 a 70 MPa. Llegaron a la conclusión de que, en general, cuanto menos resistente es la roca, más sensible es a los cambios en w . Jeng *et al.* (1996) realizaron ensayos en arenisca y observaron que los parámetros mecánicos, entre ellos UCS disminuyen en un 60% a 70%, cuando la arenisca seca se sumerge en agua. Michalopoulos y Triandafilidis (1976) encontraron que el valor de UCS de diferentes tipos de rocas, incluidas las areniscas, disminuía con el aumento del grado de saturación S_r .

Tanto Karakul y Ulusay (2013) para distintos tipos de rocas sedimentarias, como Abdi *et al.* (2019) sólo para rocas tipo arenisca, ensayaron testigos de roca con distintos valores de S_r , ambos obtuvieron, con el aumento de S_r , una disminución de los valores UCS . Para estimar el valor de UCS de areniscas, directamente a partir de V_p a diferentes S_r , Karakul y Ulusay (2013) y Abdi *et al.* (2019) desarrollaron el análisis de regresión simple entre UCS y V_p en diferentes S_r . Las variaciones del UCS con V_p en diferentes S_r se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 4.

La Figura 4 muestra que tanto los resultados obtenidos con las fórmulas empíricas propuestas por Karakul y Ulusay (2013), como Abdi *et al.* (2019), muestran una reducción significativa de UCS (entre 40% a 65%) entre los estados seco y saturado. Los resultados muestran que la mayor parte de la disminución de UCS se produce en un S_r entre 0 y 0.50 de la condición de saturación total. Además, se observa que con el aumento del V_p las fórmulas propuestas por Abdi *et al.* (2019) arrojan valores de hasta un 49%

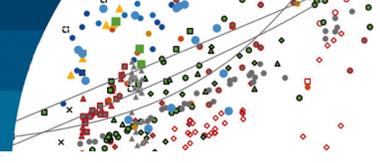


Tabla 2: Ecuaciones de regresión estadística propuestas entre UCS, V_p y S_r

Nº	Ecuación	S_r	Tipo de roca	Referencia
1	$UCS = 7.182V_p^{1.600}$	0.00	13 muestras de diferentes rocas	Karakul y Ulusay (2013)
	$UCS = 6.070V_p^{1.633}$	0.20		
	$UCS = 4.937V_p^{1.673}$	0.50		
	$UCS = 4.401V_p^{1.684}$	0.70		
	$UCS = 3.774V_p^{1.706}$	1.00		
2	$UCS = 14.64V_p^{1.742}$	0.00	6 muestras de arenisca	Abdi <i>et al.</i> (2019)
	$UCS = 10.12V_p^{1.814}$	0.25		
	$UCS = 7.981V_p^{1.714}$	0.50		
	$UCS = 6.142V_p^{1.809}$	0.75		
	$UCS = 4.271V_p^{1.886}$	1.00		

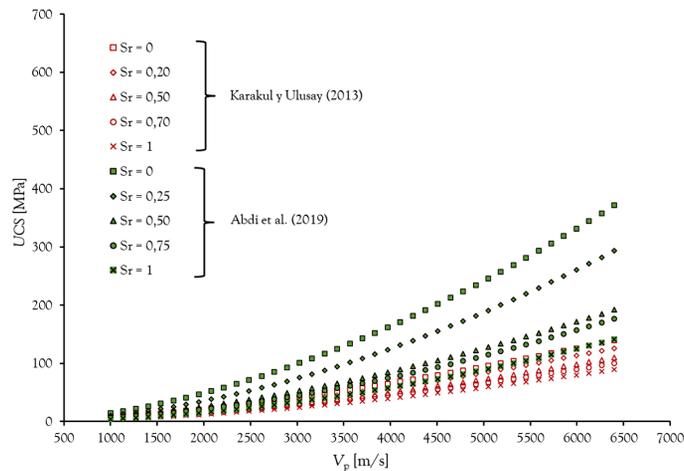


Figura 4: Ecuaciones de regresión estadística de la relación entre UCS, V_p y S_r

mayores a los obtenidos con Karakul y Ulusay (2013), esto independiente de S_r .

Metodología y resultados

Características de los métodos empíricos

Para describir la correlación entre los valores de UCS y otros parámetros indirectos de forma cuantitativa, V_p en este caso, se utilizan métodos de regresión y así se pueden determinar fórmulas empíricas. El procedimiento de regresión ajusta una recta (o curva) a través del conjunto de datos, que se calcula de modo que se minimicen las desviaciones cuadradas de los puntos medidos de esa recta. La recta se define mediante una ecuación pertinente, mientras que también se determina el valor del coeficiente

de ajuste. El valor del coeficiente de ajuste es un indicador de la calidad del modelo para la replicación de los resultados de los datos.

Considerando que, los tipos de fórmulas son determinadas subjetivamente en la mayor parte de la literatura. Convencionalmente, se utilizan diferentes tipos de ecuaciones, como funciones lineales, exponenciales, de potencia, logarítmicas, etc., para realizar el ajuste de mínimos cuadrados, luego la fórmula final se determinaría en función de los coeficientes de ajuste, y método de error.

Integración de datos

A partir de las muestras de arenisca utilizadas en los estudios seleccionados, independientemente de la ecuación de regresión propuesta (Tabla 1 y Figura 3), se ha recopilado un total de 22 tipos de arenisca, sumando 358 ensayos UCS y V_p . La Figura 5 muestra graficados los resultados de la base de datos recopilada. Esta base de datos ha sido utilizada para evaluar la relación entre UCS y V_p en areniscas y definir una tendencia general, de acuerdo al valor de R^2 . El modelo predictivo está basado en este conjunto de datos y podrá ser aplicado sólo para predecir los valores UCS a partir de V_p para arenisca. La base de datos utilizada, recolectada de distintas fuentes está indicada en la Tabla 3.

Para los datos recolectados, el rango de valores mínimo y máximo de V_p está entre 0.95 y 6.15 km/s, respectivamente, para valores mínimo y máximo de UCS entre 4.5 y 173.7 MPa, respectivamente.

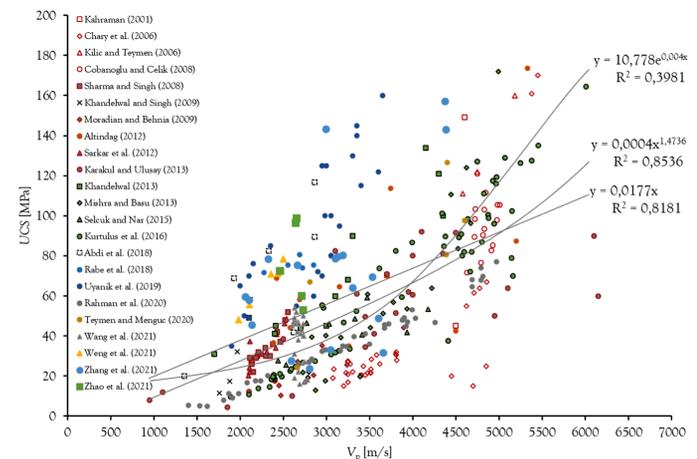


Figura 5: Base de datos obtenida de investigaciones previas para la relación UCS - V_p en arenisca

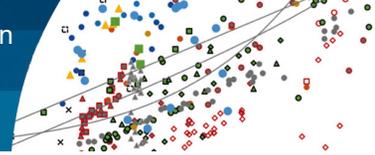


Tabla 3: Base de datos recolectados para roca sedimentaria tipo arenisca.

Nº	Número de datos	Referencia
1	3	Kharaman (2001)
2	32	Chary <i>et al.</i> (2006)
3	15	Cobanoglu y Celik (2008)
4	3	Kilic y Teymen (2008)
5	17	Sharma y Singh (2008)
6	4	Khandelwal y Singh (2009)
7	8	Moradian y Behnia (2009)
8	11	Altindag (2012)
9	10	Sarkar <i>et al.</i> (2012)
10	26	Karakul y Ulusay (2013)
11	12	Khandewal (2013)
12	20	Mishra y Basu (2013)
13	56	Kurtulus <i>et al.</i> (2016)
14	9	Selcuk y Nar (2016)
15	6	Abdi <i>et al.</i> (2018)
16	26	Uyanik <i>et al.</i> (2019)
17	5	Teymen y Menguc (2020)
18	39	Rahman <i>et al.</i> (2020)
19	27	Wang <i>et al.</i> (2021)
20	5	Weng <i>et al.</i> (2021)
21	18	Zhang <i>et al.</i> (2021)
22	6	Zhao <i>et al.</i> (2021)

Propuesta de una ecuación empírica $UCS-V_p$ para arenisca

A partir de los datos recolectados (Tabla 3 y Figura 5), se correlaciona UCS con V_p utilizando el método de regresión de mínimos cuadrados. Para este análisis son consideradas ecuaciones de forma potencial, exponencial y lineal. Son determinadas para cada regresión: la ecuación de la línea (o curva) de mejor ajuste y el coeficiente de correlación (R^2).

Considerando los rangos de valores de UCS y V_p con los cuales se ha desarrollado el análisis de regresión simple, es importante destacar que existe una variación de hasta 85% y 97%, para los valores de V_p y UCS , respectivamente. Con los datos graficados, es posible mencionar que existe una gran dispersión y que es difícil establecer una única relación entre UCS y V_p (Figura 5). Además, cuanto mayor sea el valor de UCS , mayor es la dispersión de los datos. La Tabla 4 resume las ecuaciones empíricas obtenidas del análisis de regresión simple, donde los valores de UCS y V_p están en MPa y m/s, respectivamente.

Tabla 4: Ecuaciones de regresión estadística propuestas para arenisca

Nº	Ecuación	R^2	Tipo de ecuación
1	$UCS = 0.0004V_p^{1.4736}$	0.8536	Potencial
2	$UCS = 0.0177V_p$	0.8181	Lineal
3	$UCS = 10.778 \exp[0.0004V_p]$	0.3981	Exponencial

Dado que a medida que aumenta V_p existe una mayor dispersión de UCS , la capacidad de estimar UCS usando V_p es más confiable para V_p bajos y es menos confiable para V_p altos.

Las ecuaciones de regresión obtenidas en este trabajo se han representado y comparado con las obtenidas por otros investigadores en las Figuras 6(a) y 6(b), donde se muestra la variabilidad de resultados que pueden ser obtenidos usando fórmulas empíricas para estimar el valor de UCS en función de V_p . Las fórmulas de tipo potencial y lineal tienen los mayores coeficientes de correlación, $R^2 = 0.8536$ y 0.8181 , respectivamente, mientras que la fórmula de tipo exponencial tiene el menor valor de $R^2 = 0.3981$.

Desempeño de la ecuación empírica $UCS-V_p$ para arenisca

Las ecuaciones empíricas derivadas de este estudio (Tabla 4) han sido evaluadas comparando sus resultados entre sí. Los datos medidos, recolectados en la Tabla 1, han sido utilizados para comparar y estimar UCS . Para demostrar la confiabilidad y precisión de las ecuaciones derivadas, valores de UCS medidos se compararon con los UCS estimados usando las ecuaciones de forma potencial, lineal y exponencial (ver Figuras 7(a)-7(c)).

La Figura 7(a) muestra los valores estimados con la ecuación (1) de la Tabla 4, los cuales son los más cercanos a la recta 1:1 y las diferencias individuales entre los valores UCS calculados y medidos, también llamados error absoluto, muestran una distribución equilibrada (ver Figura 8(a)). Sin embargo, para los valores estimados con las ecuaciones (2) y (3) de la Tabla 4, en todo rango de UCS existe una alta dispersión entre los valores medidos y estimados. Por lo tanto, se puede afirmar una confiabilidad de media a alta de la ecuación (1) para la estimación de UCS en función de V_p para arenisca.

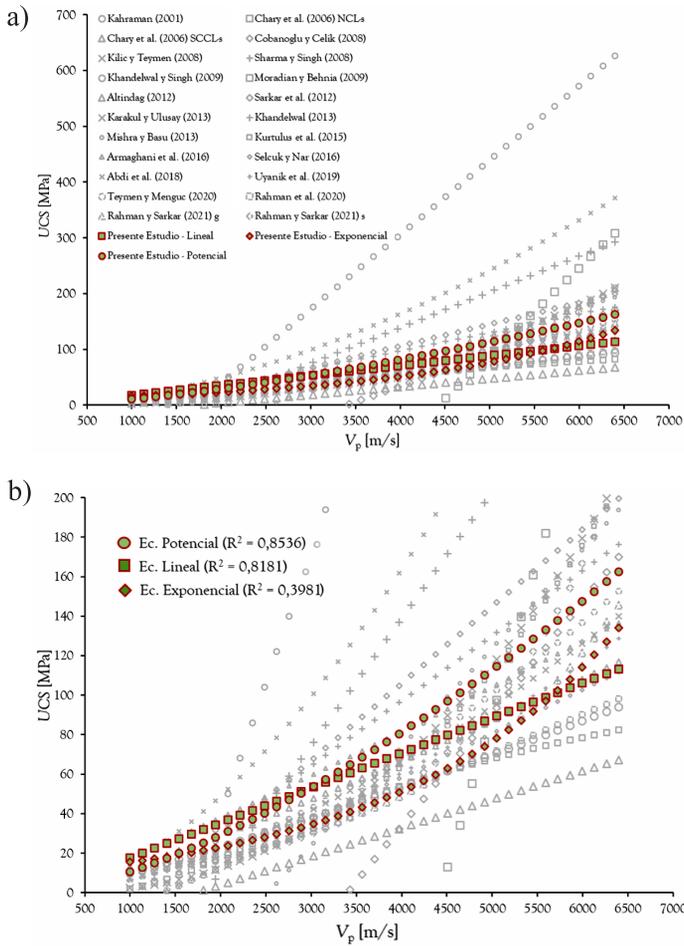
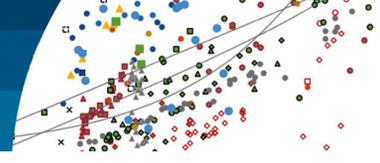


Figura 6: a) Ecuaciones de regresión estadística propuesta para la relación entre UCS y V_p y b) acercamiento para $UCS < 200$ MPa

Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se ha desarrollado un estudio de la correlación entre la resistencia a la compresión simple UCS y la velocidad de propagación de ondas de compresión V_p en roca sedimentaria tipo arenisca. A continuación, se indican las principales conclusiones del trabajo realizado, con el fin de responder a los objetivos planteados al principio de la realización de este trabajo.

- Se recolectó un conjunto de datos experimentales de estudios previos (358 ensayos de 22 de tipos de arenisca), para describir la correlación estadística entre UCS y V_p .
- Se derivaron tres fórmulas empíricas, de forma potencial, lineal y exponencial, con coeficiente de correlación, $R^2 = 0.85, 0.81, 0.39$, respectivamente.

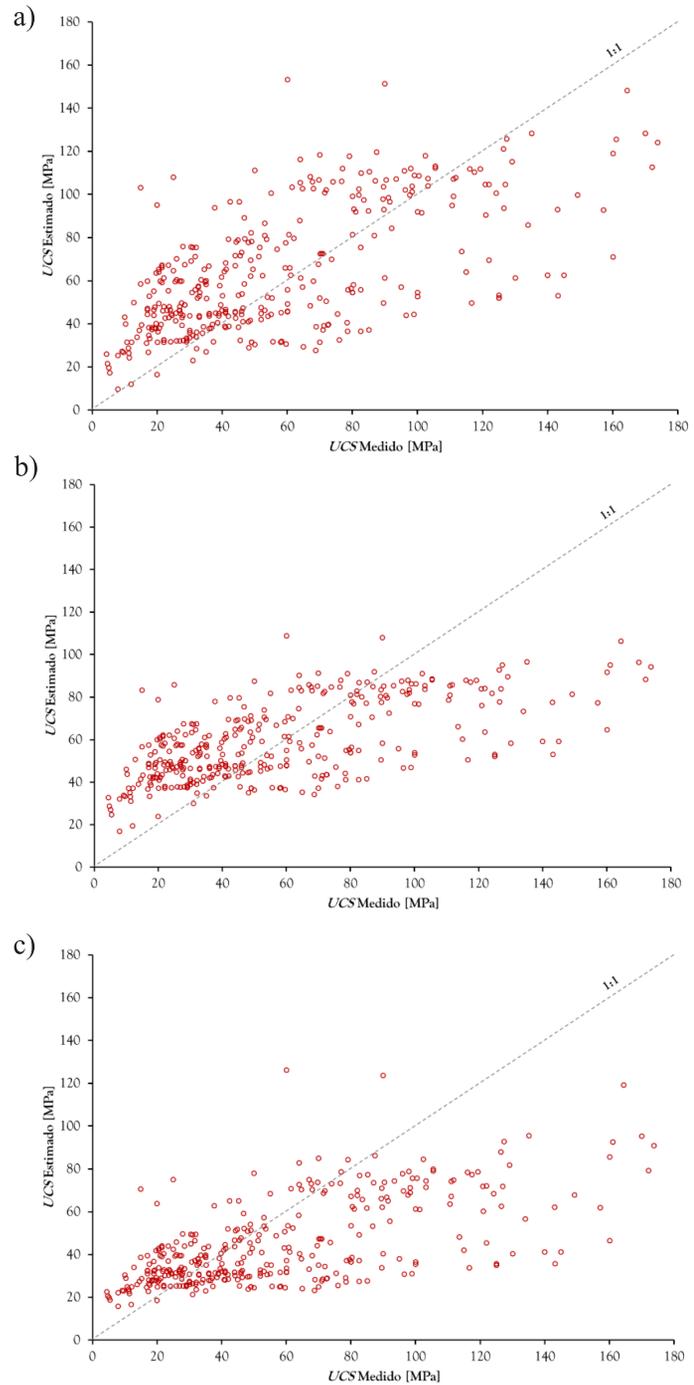


Figura 7: Comparación entre los valores medido y estimado de UCS para ecuaciones de forma: (a) potencial, (b) lineal y (c) exponencial

- Con lo anterior, se recomienda la utilización de la fórmula de forma potencial para predecir el valor de UCS a partir de V_p de manera fácil. Con menos precisión se podría utilizar la fórmula empírica de forma lineal. Finalmente, no se recomienda utilizar la fórmula empírica de forma exponencial.

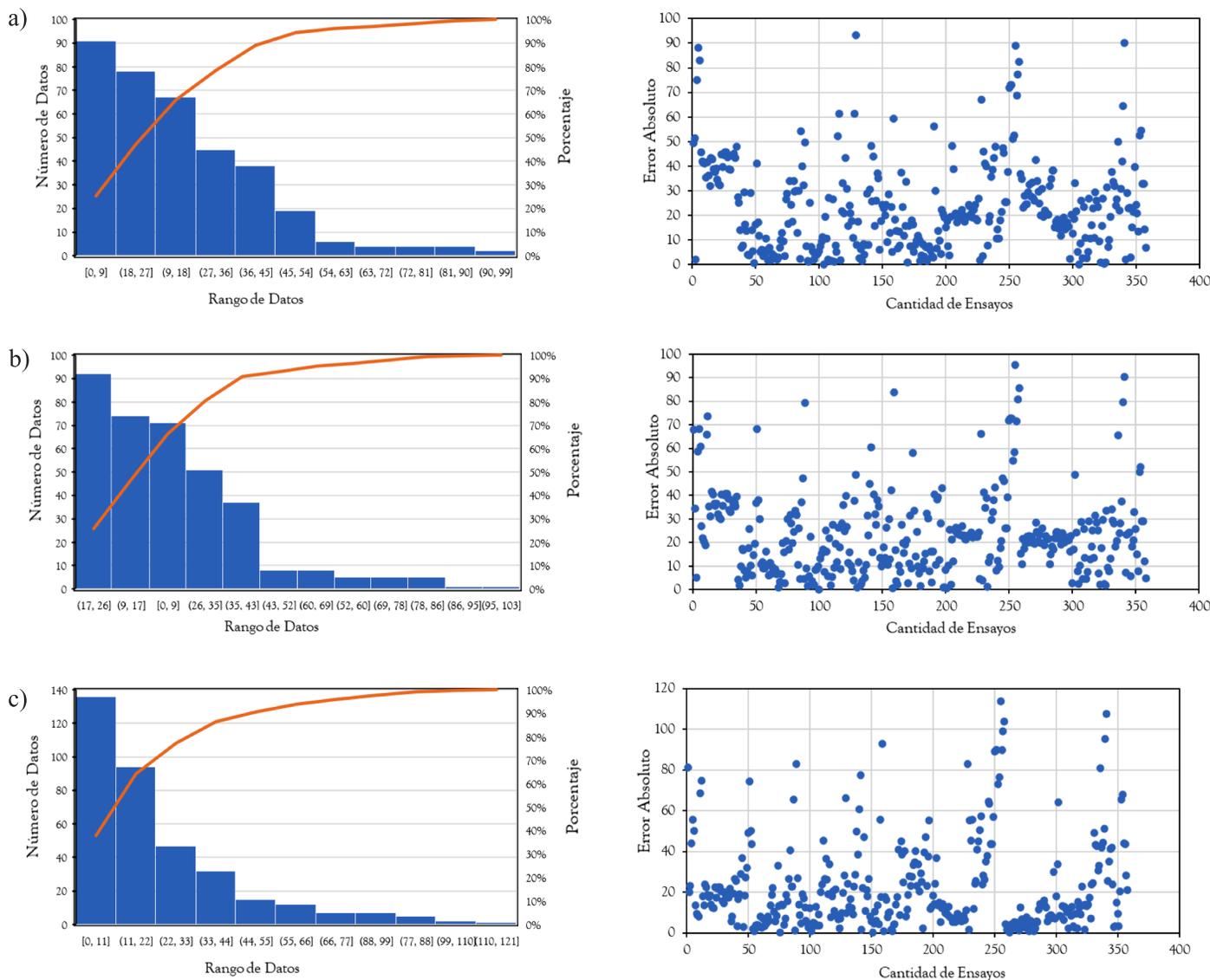
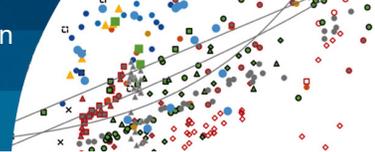


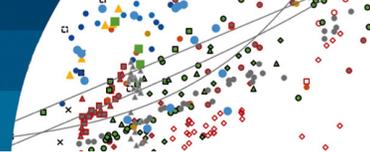
Figura 8: Valores de error absoluto para ecuaciones de forma: (a) potencial, (b) lineal, y (c) exponencial

Basándose en el estudio y los resultados obtenidos, se considera de interés continuar el desarrollo de una línea de investigación relacionada con los siguientes temas:

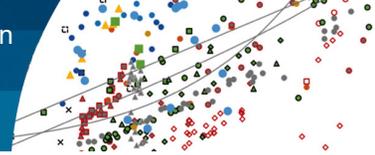
- Desarrollar y validar una fórmula empírica para UCS en función de más parámetros geomecánicos, como porosidad y grado de saturación. Para esto se recomienda utilizar análisis de regresión múltiple u otro tipo de análisis de regresión avanzado (ANFIS, GEP, ANN u otro).
- Aumentar la base de datos experimental a más tipos de rocas sedimentarias, y otros tipos de rocas como ígneas y metamórficas.

Referencias

- Abdi, Y., Khanlari, G.R. and Jamshidi, A. (2019). Correlation between mechanical properties of sandstones and P-wave velocity in different degrees of saturation. *Geotechnical and Geological Engineering*, doi.org/10.1007/s10706-018-0721-6
- Altindag, R. (2012). Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **112**(3), 229-237
- Armaghani, D.J., Amin, M.F.M., Yagiz, S., Faradonbeh, R.S. and Abdullah, R.A. (2016). Prediction of the uniaxial compressive strength of sandstone using various modeling techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **85**, 174-186



- ASTM D7012 (2014). Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. ASTM International, West Conshohocken PA, USA
- Aydin, A. (2014). Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 47(1), 255–259
- Blatt, H. and Jones R.L. (1975). Proportions of exposed igneous, metamorphic, and sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin* 86(8), 1085-1088
- Baykasoğlu, A., Güllü, H., Çanakçı, H. and Özbakır, L. (2008). Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming. *Expert Systems with Applications* 35(1-2), 111-123
- Burshtein, L.S. (1969). Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone. *Soviet Mining Science* 5(5), 573-576
- Chary, K.B., Sarma, L.P., Prasanna, K.J., Vijayakumar, N.A., Naga, V. and Rao, M.V.M.S. (2006). Evaluation of engineering properties of rock using ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength. *National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Hyderabad, India, 379-385
- Çobanoğlu, İ. and Çelik, S.B. (2008). Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67(4), 491-498
- Colback, P.S.B. and Wild, B.L. (1965). The influence of moisture content on the compressive strength of rocks. *Third Canadian Symposium of Rock Mechanics*, Department of Mines and Technical Survey, Toronto, Canada, 65-83
- Dehghan, S., Sattari, G.H., Chelgani, S.C. and Aliabadi, M.A. (2010). Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural networks. *Mining Science and Technology (China)* 20(1), 41-46
- Dyke, C.G. and Dobereiner, L. (1991). Evaluating the strength and deformability of sandstones. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 24(1), 123 - 134
- Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Zorlu, K. (2009). Estimating the uniaxial compressive strength of some clay-bearing rocks selected from Turkey by nonlinear multivariable regression and rule-based fuzzy models. *Expert Systems* 26(2), 176-190
- Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(2), 203-215
- ISRM (2007). Suggested methods for determining sound velocity. In *The complete ISRM suggested methods for rock characterisation, testing and monitoring: 1974-2006. The blue book* (R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.)). International Society of Rock Mechanics ISRM, Commission on Testing Methods, Ankara, Turkey, 113–120
- ISRM (1981). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Society of Rock Mechanics ISRM. Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests, 111–116
- Jeng, F.S. Lee, I.T. and Huang, T.H. (1996). Deterioration of weak rock induced by wetting process. *Taiwan Rock Engineering Symposium*, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 373-382
- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38(7), 981-994
- Kahraman, S. (2007). The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics* 46(4), 341-348
- Karakul, H. and Ulusay, R. (2013). Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(5), 981-999
- Khandelwal, M. and Singh, T.N. (2009). Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. *International Journal of Coal Geology* 79(1-2), 55-60
- Khandelwal, M. (2013). Correlating P-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks. *Pure and Applied Geophysics* 170(4), 507-514
- Kılıç A.L. and Teymen, A. (2008). Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67(2), 237-244
- Kurtuluş, C., Sertçelik, F. and Sertçelik, I. (2016). Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity. *Acta Geodaetica et Geophysica* 51(3), 571-582
- Michalopoulos, L.P. and Triandafilidis, G.E. (1976). Influence of water on hardness, strength and compressibility of rock. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 13(1), 1-22



- Mishra, D.A. and Basu, A. (2013). Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system. *Engineering Geology* **160**, 54-68
- Moradian, Z.A. and Behnia, M. (2009). Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. *International Journal of Geomechanics* **9**(1), 14-19
- Monjezi, M., Amini Khoshalan, H. and Razifard, M. (2012). A neuro-genetic network for predicting uniaxial compressive strength of rocks. *Geotechnical and Geological Engineering* **30**(4), 1053-1062
- Priest, S.D. and Selvakumar, S. (1982). The failure characteristics of selected British Rocks. A report to the Transport and Research Laboratory, Department of Environment & Transport, Imperial College, London, UK
- Rahman, T., Sarkar, K. and Singh, A.K. (2020). Correlation of geomechanical and dynamic elastic properties with the P-wave velocity of Lower Gondwana coal measure rocks of India. *International Journal of Geomechanics* **20**(10), 04020189
- Rahman, T. and Sarkar, K. (2021). Lithological control on the estimation of uniaxial compressive strength by the P-wave velocity using supervised and unsupervised learning. *Rock Mechanics and Rock Engineering* **54**(6), 3175-3191
- Sarkar, K., Vishal, V. and Singh, T.N. (2012). An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering* **30**(2), 469-479
- Selçuk, L. and Nar, A. (2016). Prediction of uniaxial compressive strength of intact rocks using ultrasonic pulse velocity and rebound-hammer number. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **49**(1), 67-75
- Sharma, P.K. and Singh, T.N. (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **67**(1), 17-22
- Teymen, A. and Mengüç, E.C. (2020). Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks. *International Journal of Mining Science and Technology* **30**(6), 785-797
- Tiryaki, B. (2008). Predicting intact rock strength for mechanical excavation using multivariate statistics, artificial neural networks, and regression trees. *Engineering Geology* **99**(1-2), 51-60
- Uyanık, O., Sabbağ, N., Uyanık, N.A. and Öncü, Z. (2019). Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **78**(8), 6003-6016
- Wang, T., Sun, Q., Jia, H., Ren, J. and Luo, T. (2021). Linking the mechanical properties of frozen sandstone to phase composition of pore water measured by LF-NMR at subzero temperatures. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **80**(6), 4501-4513
- Weng, L., Wu, Z., Liu, Q., Chu, Z. and Zhang, S. (2021). Evolutions of the unfrozen water content of saturated sandstones during freezing process and the freeze-induced damage characteristics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **142**, 104757
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences* **35**(6), 1125-1138
- Zhang, J., Shen, Y., Yang, G., Zhang, H., Wang, Y., Hou, X., Sun Q. and Li, G. (2021). Inconsistency of changes in uniaxial compressive strength and P-wave velocity of sandstone after temperature treatments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **13**(1), 143-153
- Zhao, K., Yang, D., Zeng, P., Huang, Z., Wu, W., Li, B. and Teng, T. (2021). Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **142**, 104709