



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Geológica

“ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO,  
MEDIANTE MÉTODO DE KRIGING PARA EL MACIZO  
ROCOSO DEL CERRO CALLACPUMA - SECTOR  
HUAYRAPONGO, 2020”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Autor:

Bach. Alex Fredy Valdivia Donayre

Asesor:

Ing. Daniel Alva Huamán

Cajamarca - Perú

2020

## Tabla de contenidos

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1. Realidad problemática.....	10
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Objetivos .....	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos .....	13
1.4. Hipótesis.....	13
1.4.1. Hipótesis general.....	13
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Tipo de investigación.....	14
2.2. Población y muestra (Materiales y métodos) .....	14
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....	15
2.4. Procedimiento .....	16
2.5. Aspectos generales.....	26
2.6. Geología local .....	29
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
3.1. Geología estructural.....	31
3.2. Caracterización granulométrica .....	34
3.3. Caracterización de pendientes .....	35
3.4. Registro de estimación .....	38
3.5. Análisis geoestadístico .....	46
3.5.1. Análisis exploratorio de datos.....	52
3.5.2. Análisis de correlación bivariar y multivariar .....	59
3.5.3. Variografía .....	66
3.5.3.1. Comportamiento estructural y definición del modelo del variograma teórico	82
3.5.3.2. Predicción mediante Kriging de los parámetros geomecánicos .....	88
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>
ANEXO N°1. Pendientes promedio en la zona de estudio.....	104
ANEXO N°2. Viviendas cercanas a las laderas del cerro Callacpuma. ....	105
ANEXO N°3. Desprendimiento de roca .....	106

ANEXO N°4. Presencia de turistas en el cerro Callacpuma.....	107
ANEXO N°5. Coordenadas de las estaciones geomecánicas. ....	108
ANEXO N°6 Plano geológico de la zona de estudio.....	110
ANEXO N°7 Rumbos y buzamientos de los estratos.....	111
ANEXO N°8 Probabilidad de precipitación.....	113
ANEXO N°9 Vegetación en la zona de estudio.....	114
ANEXO N°10 Estación geomecánica N° 7.....	115
ANEXO N°11. Validación cruzada RCU .....	116
ANEXO N°12. Validación cruzada JRC .....	118
ANEXO N°13. Validación cruzada RQD Lineal.....	120
ANEXO N°14. Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades .....	122

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas.....	17
Tabla 2 Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial.....	20
Tabla 3 Correlación del JRC .....	22
Tabla 4 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según RQD .....	24
Tabla 5 Descripción del espaciado .....	25
Tabla 6 Coordenadas UTM WGS84 del área de estudio.....	27
Tabla 7 Accesibilidad al área de estudio .....	28
Tabla 8 Valores RCU de cada estación geomecánica.....	38
Tabla 9 Valores JRC de cada estación geomecánica .....	40
Tabla 10 Valores RQD obtenidos en cada estación geomecánica .....	42
Tabla 11 Valores de Espaciado obtenidos en cada estación geomecánica .....	44
Tabla 12 Coordenadas UTM WGS84 de las estaciones geomecánicas.....	108
Tabla 17 Rumbos y buzamientos de los estratos. ....	111
Tabla 13 Validación cruzada RCU .....	116
Tabla 14 Validación cruzada JRC .....	118
Tabla 15 Validación cruzada de RQD Lineal.....	120
Tabla 16 Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades .....	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Malla de muestreo.....	15
Figura 2 Toma de datos para RCU.....	18
Figura 3 Gráfico de correlación para el martillo Schmidt. ....	19
Figura 4 Diagrama para determinar JRC. ....	21
Figura 5 Toma de datos JRC. ....	22
Figura 6 Toma de datos para RQD Lineal.....	23
Figura 7 Toma de datos para Espaciamiento de las discontinuidades. ....	25
Figura 8 Plano de ubicación del área de estudio.....	27
Figura 9 Accesibilidad al área de estudio. ....	28
Figura 10 Formación Farrat (Ki-fa).....	30
Figura 11 Plano estructural del área de estudio. ....	32
Figura 12 Diagrama de rosas de la zona de estudio.....	33
Figura 13 Diagrama de polos de la zona de estudio. ....	33
Figura 14 Arenisca blanca de grano fino. ....	34
Figura 15 Microconglomerado. ....	34
Figura 16 Pendientes pronunciadas de la zona de estudio. ....	36
Figura 17 Plano de pendientes.....	37
Figura 18 Análisis estadístico de RCU.....	47
Figura 19 Histograma de RCU. ....	47
Figura 20 Análisis estadístico de JRC. ....	48
Figura 21 Histograma de JRC. ....	49
Figura 22 Análisis estadístico de RQD.....	49
Figura 23 Histograma de RQD Lineal.....	50
Figura 24 Análisis estadístico de Espaciado de las discontinuidades. ....	51
Figura 25 Histograma de Espaciado de las discontinuidades. ....	51
Figura 26 Test de normalidad RCU (Mpa).....	53
Figura 27 Test de normalidad JRC. ....	54
Figura 28 Test de normalidad RQD Lineal (%). ....	55
Figura 29 Test de normalidad Espaciado (m). ....	56
Figura 30 Análisis de tendencia RCU (Mpa). ....	57
Figura 31 Análisis de tendencia JRC.....	57
Figura 32 Análisis de tendencia RQD Lineal (%). ....	58
Figura 33 Análisis de tendencia Espaciado (m).....	59
Figura 34 Análisis bivariado JRC vs. RCU (Mpa). ....	60
Figura 35 Análisis bivariado RQD Lineal vs. RCU (Mpa). ....	61
Figura 36 Análisis bivariado Espaciado (m) vs. RCU (Mpa). ....	62
Figura 37 Análisis bivariado JRC vs. RQD Lineal %. ....	63
Figura 38 Análisis bivariado JRC vs. Espaciado (m). ....	64
Figura 39 Análisis bivariado RQD Lineal % vs. Espaciado (m). ....	65
Figura 40 Matriz de correlación multivariable. ....	66
Figura 41 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	67
Figura 42 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	67
Figura 43, Modelo esférico con ángulo de 90°.....	67
Figura 44 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	68
Figura 45 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	68
Figura 46 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	68
Figura 47 Modelo Exponencial con ángulo de 90°.....	69
Figura 48 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	69
Figura 49 Modelo Gaussiano con ángulo de 0°.....	69
Figura 50 Modelo Gaussiano con ángulo de 45°.....	70
Figura 51 Modelo Gaussiano con ángulo de 90°.....	70
Figura 52 Modelo Gaussiano con ángulo de 135°.....	70
Figura 53 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	71
Figura 54 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	71

Figura 55 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	71
Figura 56 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	72
Figura 57 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	72
Figura 58 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	72
Figura 59 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	73
Figura 60 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	73
Figura 61 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	73
Figura 62 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	74
Figura 63 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	74
Figura 64 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	74
Figura 65 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	75
Figura 66 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	75
Figura 67 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	75
Figura 68 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	76
Figura 69 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	76
Figura 70 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	76
Figura 71 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	77
Figura 72 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	77
Figura 73 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	77
Figura 74 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	78
Figura 75 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	78
Figura 76 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	78
Figura 77 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	79
Figura 78 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	79
Figura 79 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	79
Figura 80 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	80
Figura 81 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	80
Figura 82 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	80
Figura 83 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	80
Figura 84 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	81
Figura 85 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	81
Figura 86 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	81
Figura 87 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	82
Figura 88 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	82
Figura 89 Variograma de RCU.....	83
Figura 90 Reporte final del método, RCU.....	84
Figura 91 Variograma de JRC.....	84
Figura 92 Reporte final del método, JRC.....	85
Figura 93 Variograma de RQD lineal.....	86
Figura 94 Reporte final del método, RQD Lineal.....	87
Figura 95 Variograma de Espaciado de las discontinuidades.....	87
Figura 96 Reporte final del método, Espaciado de las discontinuidades.....	88
Figura 97 Plano de estimación RCU.....	89
Figura 98 Plano de variación RCU.....	90
Figura 99 Plano de estimación JRC.....	91
Figura 100 Plano de variación JRC.....	92
Figura 101 Plano de estimación RQD Lineal.....	93
Figura 102 Plano de variación RQD Lineal.....	94
Figura 103 Plano de estimación de Espaciado de las discontinuidades.....	95
Figura 104 Plano de variación de Espaciado de las discontinuidades.....	96
Figura 105 Pendientes moderadas a empinadas.....	104
Figura 106 Viviendas aledañas al macizo rocoso.....	105
Figura 107 Desprendimiento de roca.....	106
Figura 108 Afluencia de turistas en el cerro Callacpuma.....	107
Figura 109 Plano geológico del área de estudio.....	110
Figura 110 Probabilidad diaria de precipitación en Llacanora.....	113
Figura 111 Vegetación arbustiva y arbórea en la zona de estudio.....	114
Figura 112 Estación geomecánica N°7.....	115

## RESUMEN

En esta investigación se estimó mediante el método geoestadístico de Kriging, el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo. Se consideró como muestra a las 43 estaciones geomecánicas macizo rocoso del cerro Callacpuma y la población total del macizo.

La investigación es aplicada, con alcance descriptivo y diseño no experimental. Se fundamenta en el análisis cuantitativo de los parámetros geomecánicos tales como: el coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC) empleando el Peine de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) empleando el martillo Schmidt, la designación de la calidad de la roca (RQD) presente en un metro cuadrado, el espaciado de las discontinuidades representativas de los estratos. Se integró estos valores en una data geoestadística para finalmente analizarlos mediante planos de estimación. El tratamiento de la data se hizo con los softwares Excel, ArcGIS y Minitab 19. Los resultados fueron RCU (resistente a muy resistente), JRC (rugosa), RQD (media a buena), espaciado (medianamente junto). Los planos de estimación representan una fuente confiable para identificar las zonas críticas del macizo; y así ser tomadas en cuenta por parte de las autoridades pertinentes para establecer las medidas preventivas necesarias.

**Palabras clave:** Geoestadística, Kriging, Comportamiento Geomecánico.

## **NOTA DE ACCESO**

**No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales**



## REFERENCIAS

- Barton, N. R., & Bandis, S. C. (1982). *Effects of block size on the shear behavior of*. 23rd U.S. symp. on rock mechanics, 739-760.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock mechanics. *Rock mechanics*, 10(1-2), 1-54.
- Bieniawski, Z. (1976). *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering. 1, 97-106.
- Cely Pulido, J., Siabato Vaca, W., Sánchez Ipiá, A., & Rangel Sotter, A. (2002). *Geoestadística Aplicada a Estudios de Contaminación Ambiental*. Ciencia Investigación Academia Desarrollo, 2(2), 31-38.
- Egaña E., M. (2008). *Geoestadística Aplicada a Parámetros Geotécnicos (Tesis de Pregrado)*. Santiago de Chile.
- Emery, X. (2007). *Apunte de Geoestadística*. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- Ferrari, F. (2014). *Rock Mass Characterization And Spatial Estimation Of Geomechanical Properties Through Geostatistical Techniques (Tesis Doctoral)*. Milano.
- Ferrari, F., Apuani, T., & Giani, G. P. (2014). *Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 70, 162-176. doi:10.1016/j.ijrmms.2014.04.016
- Ferrer, M., & Gonzales, L. (2007). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos (2° ed) Serie: guías y manuales, N° 4*. Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Heras, K. (2017). *Estudio de las estructuras de emplazamiento de cuerpos ígneos plutónicos entre la comunidad de Michiquillay y el sector el Punre*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165-1186. doi: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI); *Programa De Prevención Y Medidas De Mitigación Ante Desastres Ciudad De Cajamarca*. Cajamarca.
- ISRM. (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and, 15(6):319-368.
- Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2004). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, 300.
- Londoño, L., & Valdés, J. C. (2012). *Geoestadística Aplicada: Generación de Mapas de Interpolación para el Estudio de Fenómenos Distribuidos Espacialmente*. Alemania: Academia Española.
- Luza, C., & Sosa, N. (2016). *Caída de rocas en el sector de Huamatambo. Distrito Huamatambo, provincia Castrovirreyna, departamento Huancavelica. N° A6702*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1183>. Huancavelica: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- McBratney, A., Webster, R., & Burgess, T. (1981). *The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I*. Computers and Geosciences. 7(4), 331-334.

- Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Ph. D. thesis Universidad de Illinois. EEUU. Illinois.
- Minitab. (2019). <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/key-results/#:~:text=Por%20lo%20general%2C%20un%20nivel,s%C3%AD%20siguen%20una%20distribuci%C3%B3n%20normal>.
- Ordaz, A., Esquivel, R., Hernández, J., & Cabadas, H. (2019). *Susceptibilidad A Desprendimientos De Rocas En La Urbanización La Teresona-Zopilocalco Norte, Toluca*: Premisas Para El Desarrollo Comunitario. Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM, 99(59888), 2448-7279. doi:10.14350/rig.59888.
- Ortiz, J. (2006). *Apuntes de Simulación Geoestadística*. Cátedra CODELCO de Evaluación de Yacimientos. Santiago: Depto. de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- Palmstrom, A. (1982). *The volumetric joint count: a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing*. Proceedings of the IAEG congress. New Delhi, 221–28.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). *Discontinuity spacings in rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. 13, 135–148.
- Rodríguez, S. (2018). *Impactos Geotécnico-Ambientales En Cabeceras De Subcuencas Por Implantación De Minas Conga Cajamarca-Perú*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Cajamarca .
- Rojas, V. M. (2011). *Metodología de la investigación. Diseño y ejecución*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Tarrillo, R. (2018). *Grado De Estabilidad De Los Taludes Críticos De La Carretera Baños Del Inca - Llacanora (Tesis de Pregrado)*. Cajamarca.
- Weather Spark. (s.f. de s.f. de s.f.). © Cedar Lake Ventures, Inc. Obtenido de <https://weatherspark.com/>
- Zavala, B., & Roxana, B. (2007). *Zonas Críticas Por Peligros Geológicos Y Geohidrológicos En La Región Cajamarca*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.