

Modélisation géostatistique de variables géotechniques et hydrogéologiques

L. Katherine SÁNCHEZ

L'identification des propriétés géomécaniques et hydrauliques d'un massif rocheux est une tâche cruciale pour le développement économique des exploitations minières, aussi bien à ciel ouvert que souterraines. La gestion des coûts en ingénierie géotechnique est très importante, mais doit être équilibrée avec une caractérisation détaillée et complète des formations géologiques, en particulier dans les travaux souterrains, où l'incertitude doit être réduite et la sécurité des travailleurs doit être garantie au plus bas coût possible, ce qui oblige à connaître la résistance du massif rocheux pour dimensionner adéquatement les infrastructures souterraines ou pour définir la géométrie de la pente dans le cas des exploitations minières à ciel ouvert.

Les phénomènes géologiques présentent des hétérogénéités spatiales impliquant des transitions entre zones de plus ou moins grandes résistance et rigidité, montrant un contraste élevé à courte échelle. Ceci empêche la prédictibilité du comportement mécanique du massif rocheux et rend impossible de le modéliser de façon déterministe. Dans ce contexte, l'utilisation des techniques probabilistes a augmenté au cours des dernières décennies, visant à obtenir des plages de valeurs et des facteurs de sécurité au lieu de valeurs déterministes. Une des limites pratiques à la mise en œuvre de ces méthodologies est qu'elles supposent souvent que les variables étudiées ne sont pas structurées dans l'espace.

La complexité des problèmes géotechniques et hydrogéologiques nécessite l'utilisation de nouvelles méthodes qui permettent de réduire de manière significative l'incertitude associée à la variabilité géologique et géomécanique. À cet égard, la géostatistique offre des outils qui prennent en compte le comportement spatial des paramètres, contrairement aux techniques probabilistes traditionnelles, et qui fournissent une prédiction précise de ces paramètres, accompagnée de mesures d'incertitude, contrairement à l'approche déterministe. Cependant, les difficultés rencontrées dans l'application des techniques géostatistiques en géotechnique se trouvent dans le manque d'additivité des variables, ce qui complique le changement de support (d'un échantillon à un bloc), ainsi que la directionnalité de certaines de ces variables (la mesure dépend de la direction de l'échantillonnage, c'est-à-dire que ces quantités sont en fait les composantes d'un tenseur). Ceci explique la mise en œuvre limitée de la géostatistique dans ce domaine.

Pour surmonter ces limitations, nous proposons un nouveau modèle conceptuel dans lequel la continuité spatiale des variables géomécaniques et hydrogéologiques corrélées (directionnelles et non directionnelles) devrait être modélisée à l'aide d'une analyse par variogramme multivariée. Dans cette analyse, nous considérerons les variables directionnelles définies dans un espace de 5 dimensions (est, nord, altitude, azimut, pendage), tandis que les variables non-directionnelles seront définies dans l'espace de 3 dimensions (est, nord, altitude). Il est suggéré de décomposer les fonctions de covariance des variables directionnelles en tant que produit (ou somme de produits) d'une covariance spatiale (en fonction des coordonnées est, nord et altimétrique) et d'une covariance directionnelle (en fonction de l'azimut et du pendage). Les corrélations croisées entre les variables peuvent être modélisées par des termes spatiaux. En ce qui concerne les termes directionnels, une attention particulière sera portée aux contraintes de périodicité présentées par les angles (azimut et inclinaison). Cette nouvelle approche conceptuelle vise à améliorer la caractérisation géomécanique de la masse rocheuse, essentielle au développement économique des mines souterraines ou à ciel ouvert, et à améliorer notre compréhension de la réaction des roches et de l'eau (contenues dans une masse rocheuse) aux changements de l'état de tension et du régime de pression hydraulique causés par les activités minières, afin de développer des modèles géomécaniques plus précis couplés à l'avancement de l'excavation.

Version en anglais

The identification of the geomechanical and hydraulic properties of a rock mass is a crucial task for the economic development of mining operations, both for open pit and underground mining. The management of costs in geotechnical engineering is very important, but must be balanced with a detailed and comprehensive characterization of geological formations, particularly in underground work, where uncertainty must be reduced and workers' safety must be guaranteed at the lowest possible level cost, which makes it necessary to know the strength of the rock mass to adequately size the underground infrastructure or to define the geometry of the slope in the case of open-pit mining.

The geological phenomena present spatial heterogeneities involving transitions between zones of greater or lesser strength and rigidity, showing a high contrast at short scale. This prevents the predictability of the mechanical behaviour of the rock mass and makes it impossible to model it deterministically. In this context, the use of probabilistic techniques has increased in recent decades, aiming to obtain ranges of values and safety factors instead of deterministic values. One of the practical limitations to implementing these methodologies is that they often assume that the variables under consideration are not spatially structured.

The complexity of geotechnical and hydrogeological problems requires the use of new methods that significantly reduce the uncertainty associated with geological and geomechanical variability. In this respect, geostatistics offers tools that take into account the spatial behaviour of the parameters, contrary to traditional probabilistic techniques, and that provide an accurate prediction of these parameters, accompanied by uncertainty measures, contrary to the deterministic approach. However, the difficulties encountered in the application of geostatistical techniques in geotechnics are found in the lack of additivity of the variables, which complicates the change of support (from a sample to a block), as well as the directionality of some of these variables (the measurement depends on the direction of sampling, i.e. these quantities are in fact the components of a tensor). This explains the limited implementation of geostatistics in this area.

To overcome these limitations, we propose a new conceptual model where the spatial continuity of correlated geomechanical and hydrogeological variables (directional and non-directional) should be modelled by using a multivariate variogram analysis. In this analysis, we will consider the directional variables defined in a space of 5 dimensions (east, north, elevation, azimuth, dip), while non-directional variables will be defined in the space of 3 dimensions (east, north, elevation). It is suggested to decompose the covariance functions of the directional variables as the product (or sums of products) of a spatial covariance (depending on the east, north, and elevation coordinates) and a directional covariance (depending on azimuth and dip). Cross-correlations between variables can be modelled through spatial terms. Regarding the directional terms, attention will be paid to the periodicity constraints presented by the angles (azimuth and inclination). This new conceptual approach aims to a better geomechanical characterisation of the rock mass that is critical for the economic development of underground or open-pit mining and advance in our understanding regarding the response of the rocks and water (contained in a rock mass) to changes in the state of tension and the hydraulic pressure regime caused by mining operations, in order to develop more accurate geomechanical models coupled to the advance of the excavation.