

Curso de Postgrado

Problema inverso aplicado a la geofísica ambiental

Marina Rosas Carbajal

Propósito general y modalidad del curso

En los últimos años, la geofísica ha ocupado un rol fundamental en el estudio de procesos físicos en los primeros metros del subsuelo terrestre a través de la adaptación de métodos originalmente desarrollados con fines de exploración [1]. El problema inverso, que consiste en inferir información sobre un modelo físico a partir de observaciones (datos) [2], resulta de crucial importancia en los estudios de geofísica ambiental, tanto así que en los últimos años se han desarrollado metodologías y algoritmos de resolución del problema inverso específicamente concebidos para esta disciplina.

El objetivo de este curso es familiarizar a los estudiantes de posgrado con las técnicas de inversión que constituyen el estado del arte en geofísica aplicada al medio ambiente. Para ello, se presentará una introducción a la teoría del problema inverso general, discutiendo los enfoques deterministas y probabilistas y los grandes avances relacionados con estas teorías de los últimos años. Luego, la presentación de las técnicas concretas de inversión se realizará al mismo tiempo que las aplicaciones geofísicas a estudios ambientales. Las aplicaciones incluyen la delimitación de sistemas hidrotermales en volcanes, caracterización de depósitos aluviales, estimación y monitoreo del contenido de agua en el subsuelo, caracterización de medios fracturados, seguimiento de experiencias de fracking en geotermia y el monitoreo de intrusión salina en acuíferos costeros, entre otros. Para ello se revisarán los métodos geofísicos eléctricos, electromagnéticos, gravimetría, georadar y métodos sísmicos, entre otros. Los estudiantes completarán el aprendizaje aplicando la teoría descrita a casos específicos a través de ejercicios numéricos simples, principalmente desarrollando o utilizando códigos desarrollados en Matlab u Octave.

El presente curso está concebido para ser dictado en 30 horas que serán divididas en 5 días con 50 % del tiempo dedicado a la teoría y 50 % dedicado a la práctica. La evaluación se realizará mediante la entrega de los trabajos prácticos y una presentación oral durante el último día de curso sobre un artículo publicado recientemente relacionado con los temas tratados en el curso. A continuación se presenta una descripción detallada de los contenidos del curso día a día.

Día 1: Introducción al problema inverso en geofísica [2, 3] .

- Introducción y programa del curso.
- Problema directo y problema inverso.
- Formulación probabilística y determinística del problema inverso.
- Problemas inversos discretos y lineales.

Día 2: Problema inverso desde un punto de vista determinista [2, 4, 5] .

- Problemas inversos discretos mal definidos.
- Descomposición en valores singulares.
- Regularización del problema inverso.
- Métodos iterativos.
- Cross-validation y bootstrapping.

Día 3: Métodos de optimización global. Enfoque bayesiano del problema inverso [6, 3, 7, 8,

9, 10, 11, 12] .

- Problemas inversos no lineales.
- Métodos Monte Carlo de búsqueda “directa”: simulated annealing, genetic algorithms y otros.
- Problema inverso desde el punto de vista bayesiano. Teorema de Bayes.
- Muestreo de la función de densidad de probabilidad a posteriori.
- Rejection sampling y métodos de tipo Markov Chain Monte Carlo (MCMC).
- Criterios de convergencia.

Día 4: Métodos de inversión estocásticos en geofísica ambiental [13, 14, 15, 16, 17] .

- Problemas con la alta dimensionalidad. Métodos MCMC adaptativos.
- Tipo de parametrización e información a priori.
- Training images y multiple point geostatistical simulations.
- Two-stage MCMC.

Día 5: Inversión conjunta y model selection [18, 19, 20, 21, 22] .

- Inversión conjunta de distintos tipo de datos geofísicos: métodos deterministas y probabilísticos.
- Inclusión de modelos físicos en la inversión de datos geofísicos.
- Model selection. Factor de Bayes y algoritmos trans-dimensionales.

Referencias

- [1] S.S. Hubbard and N. Linde. Hydrogeophysics. In Peter Wilderer, editor, *Treatise on Water Science*, volume 1, pages 401–434. Oxford: Academic Press, 2011.
- [2] William Menke. *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. Academic press, 2012.
- [3] Albert Tarantola. *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. SIAM, 2005.
- [4] RL Parker. *Geophysical inverse theory*, 1994.
- [5] Steven C Constable, Robert L Parker, and Catherine G Constable. Occam’s inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3):289–300, 1987.
- [6] Albert Tarantola and Bernard Valette. Inverse problems= quest for information. *Journal of Geophysics*, 50(3):150–170, 1982.
- [7] L.E. Scales. *Introduction to nonlinear optimization*. Springer-Verlag New York Inc., 1985.
- [8] John A Scales and R Sneider. To Bayes or not to Bayes? *Geophysics*, 62(4):1045–1046, 1997.
- [9] Christian P Robert and George Casella. *Monte Carlo statistical methods*, volume 319. Citeseer, 2004.
- [10] W Keith Hastings. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1):97–109, 1970.
- [11] Klaus Mosegaard and Albert Tarantola. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7):12431–12447, 1995.

- [12] Andrew Gelman and Donald B Rubin. Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical science*, pages 457–472, 1992.
- [13] Eric Laloy and Jasper A Vrugt. High-dimensional posterior exploration of hydrologic models using multiple-try DREAM (ZS) and high-performance computing. *Water Resources Research*, 48(1), 2012.
- [14] Gareth O Roberts and Jeffrey S Rosenthal. Coupling and ergodicity of adaptive Markov chain Monte Carlo algorithms. *Journal of Applied Probability*, 44(2):458–475, 2007.
- [15] Jeannot Trampert, Roel Snieder, et al. Model estimations biased by truncated expansions: possible artifacts in seismic tomography. *Science*, 271(5253):1257–1260, 1996.
- [16] Gregoire Mariethoz, Philippe Renard, and Julien Straubhaar. The direct sampling method to perform multiple-point geostatistical simulations. *Water Resources Research*, 46(11), 2010.
- [17] L Josset, D Ginsbourger, and I Lunati. Functional error modeling for uncertainty quantification in hydrogeology. *Water Resources Research*, 51(2):1050–1068, 2015.
- [18] Marina Rosas-Carbajal, Niklas Linde, Thomas Kalscheuer, and Jasper A Vrugt. Two-dimensional probabilistic inversion of plane-wave electromagnetic data: methodology, model constraints and joint inversion with electrical resistivity data. *Geophysical Journal International*, 196(3):1508–1524, 2014.
- [19] Max Moorkamp, Björn Heincke, Marion Jegen, Alan W Roberts, and Richard W Hobbs. A framework for 3-d joint inversion of mt, gravity and seismic refraction data. *Geophysical Journal International*, 184(1):477–493, 2011.
- [20] Robert E Kass and Adrian E Raftery. Bayes factors. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430):773–795, 1995.
- [21] Niklas Linde. Falsification and corroboration of conceptual hydrological models using geophysical data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(2):151–171, 2014.
- [22] JC Afonso, J Fulla, WL Griffin, Y Yang, AG Jones, JA D Connolly, and SY O’Reilly. 3-D multiobservable probabilistic inversion for the compositional and thermal structure of the lithosphere and upper mantle. I: a priori petrological information and geophysical observables. *Journal of Geophysical Research*, 118(5):2586–2617, 2013.