



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA

Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P2I/LNEC

Lisboa • fevereiro de 2018

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 62/2018 – DBB/NGA

Título

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA

Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P2I/LNEC

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

João Casaca

Investigador-Coordenador do LNEC (aposentado)

José Nuno Lima

Investigador Auxiliar, Núcleo de Geodesia Aplicada

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 62/2018

Proc. 0404/112/19619

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P2I/LNEC

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto MEGA no triénio 2015-2017. Os resultados da atividade são analisados e avaliados, em face dos objetivos inicialmente previstos, sendo proposta uma revisão do plano de atividades para os próximos dois anos.

Palavras-chave: Análise bayesiana / GNSS / Séries temporais

MEGA – STOCHASTIC METHODS IN APPLIED GEODESY Progress report 2015-2017 of the P2I/LNEC project

Abstract

A concise description is presented of the research activities undertaken in the MEGA project during the triennium 2015-2017. The results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project. A revised plan for the next two years is proposed.

Keywords: Bayesian analysis / GNSS / Time series

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	2
2.1	Atividade planeada	2
2.2	Análise Bayesiana	2
2.3	Controlo da qualidade	4
2.4	Análise de observações GNSS.....	4
2.5	Outras atividades	5
2.6	Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2018-2019	5
3	Divulgação de resultados	7
3.1	Publicações em livros, revistas e congressos	7
3.1.1	Edição de livros.....	7
3.1.2	Artigos em revistas internacionais	7
3.1.3	Comunicações a congressos.....	7
3.1.4	Série Informação Científica e Relatórios	7
3.2	Teses de mestrado	8
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	9
4.1	Indicadores de desempenho.....	9
4.2	Recursos humanos mobilizados	9
4.3	Aplicação a trabalhos de contrato	10
5	Considerações finais	11

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial	2
Quadro 2.2 – Proposta de revisão do plano de trabalhos.....	6
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	9
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC	10

1 | Introdução

O projeto de investigação MEGA (Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada) teve início formal em 2015/01/01 e prevê-se a sua duração até 2019/12/31. O projeto está integrado no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC e tem enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I), inserindo-se nos eixos E1 (Património Construído) e E4 (Risco e Segurança), e na temática T3 (Tecnologias da Informação).

A equipa de investigação do projeto é constituída por investigadores e técnicos do NGA/DBB. A equipa inicial era formada por: IC João Casaca, que foi o investigador responsável até final de 2016 (50%), IP Maria João Henriques (10%), IA José Nuno Lima, que passou a ser o investigador responsável em dezembro de 2016 (30%), BE Nádía Braz (10%) e BE Vasco Conde, que cessou a atividade no LNEC em março de 2015.

O IA José Nuno Lima tornou-se o responsável pelo projeto, após a aposentação do IC João Casaca, em dezembro de 2016, tendo este continuado a participar no projeto como colaborador externo.

O projeto MEGA é um estudo genérico sobre métodos estocásticos convencionais (frequentistas) e a sua generalização Bayesiana, bem como a sua aplicação a problemas de planeamento, controlo da qualidade, estimação de parâmetros e predição, em Geodesia Aplicada e áreas afins, nomeadamente a observação geodésica de barragens de betão pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (posições relativas medidas com o GNSS).

Este relatório apresenta o trabalho realizado no primeiro triénio, em face às atividades e tarefas inicialmente previstas, e enquadra as atividades e tarefas a desenvolver no último biénio de vigência do projeto.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Atividade planejada

No plano inicial do projeto MEGA foram consideradas três atividades principais e identificadas tarefas a levar a cabo no âmbito dessas atividades. As referidas atividades e tarefas encontram-se sintetizadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial

Atividade	Tarefa
A1 – Análise Bayesiana	T1.1 – Regiões de erro
	T1.2 – Entropia e divergência de Kullback-Leibler
	T1.3 – A distribuição do desvio padrão da amostra
	T1.4 – Análise multivariada
	T1.5 – Comparação de instrumentos (Bayesiana)
A2 – Controlo da Qualidade	T2.1 – Qualidade posicional
	T2.2 – Comparação de instrumentos
A3 – Análise de observações GNSS	T3.1 – Séries temporais
	T3.2 – Caracterização do ruído
	T3.3 – Implementação de filtros
	T3.4 – Comparação de modelos

A atividade desenvolvida nos três primeiros anos apresentou uma boa conformidade com o plano inicial, embora algumas tarefas tenham sido adiadas para os próximos dois anos, de modo a permitir a inclusão de outras tarefas no âmbito do projeto, que se afiguraram como importantes. Algumas publicações relacionadas com as tarefas encontram-se em fase de acabamento.

2.2 Análise Bayesiana

A atividade no âmbito da análise Bayesiana decorreu com sucesso e encontra-se documentada por várias publicações enumeradas na terceira secção deste relatório. O livro “Bayesian Analysis: General Framework” [01] proporcionou o enquadramento teórico, complementado com exemplos, necessário para a prática da análise Bayesiana.

A tarefa T1.1, que consistia na dedução das regiões de erro para as redes de triangulação geodésica sob o paradigma Bayesiano, foi levada a cabo com sucesso e encontra-se descrita num artigo intitulado “A Bayesian Approach to the Confidence Ellipses of Dam Monitoring Networks”, submetido à Survey Review. O artigo trata da construção, em cenário não informativo, de regiões de credibilidade e da sua comparação com as tradicionais regiões de confiança. Tomando a distribuição anterior de Laplace, que equivale à normalização da verosimilhança, resultam regiões de credibilidade semelhantes às regiões de confiança embora sujeitas a um fator de ampliação que diminui muito rapidamente com a redundância da rede. A prossecução desta tarefa consistirá no estudo das regiões de credibilidade em cenário informativo, tomando a distribuição anterior conjugada.

A tarefa T1.2, que consistia no estudo da “Entropia e Divergência de Kullback Leibler”, no caso das redes de triangulação geodésicas, foi levada a cabo com sucesso e os resultados foram apresentados na publicação seriada [13], onde são apresentados os conceitos de informação de Fisher, de entropia de Shannon e de entropia relativa e divergência de Kullback-Leibler. A informação de Fisher e a entropia relativa de Kullback-Leibler desempenham um papel importante na definição de funções densidade de probabilidade anteriores objetivas e invariantes em análise Bayesiana. A finalizar, o trabalho descreve a aplicação da divergência de Kullback-Leibler à medição da informação providenciada por função densidade de probabilidade (FDP) anteriores conjugadas relativamente à distribuição anterior de Laplace (tomada como padrão de não informação) e apresenta um exemplo prático ilustrativo.

A tarefa T1.3, que consistia no estudo da “Distribuição do Desvio Padrão da Amostra” foi levada a cabo com sucesso e os resultados foram apresentados na publicação seriada [14]. A distribuição do desvio padrão empírico, de amostras aleatórias normais e no modelo de Gauss-Markov, foi estudada sob os cenários frequentista e Bayesiano, neste último cenário, foram consideradas as distribuições anteriores de Laplace, Jeffreys e conjugada. Este estudo proporcionou uma base teórica para as tarefas T1.5 e T2.2, uma vez que a comparação de instrumentos de medição é geralmente baseada em estimativas do desvio padrão.

A tarefa T1.4, que consistia no estudo da “Análise Multivariada”, sob o paradigma Bayesiano, foi levada a cabo com sucesso e os resultados foram apresentados na publicação seriada [12]. Foram deduzidas as FDP conjuntas e marginais posteriores e as FDP preditivas anteriores e posteriores correspondentes a amostras aleatórias normais multivariadas. Foram apresentados como exemplos de aplicação: i) a análise preditiva posterior de uma base permanente GNSS; ii) a classificação supervisionada de imagens numéricas multiespectrais.

A tarefa T1.5, que consistia no estudo da “Comparação de Instrumentos” sob o paradigma Bayesiano, veio a verificar-se redundante, pois beneficiou dos estudos levados a cabo nas tarefas T1.3 (Distribuição do Desvio Padrão da Amostra) e T2.2 (Comparação de Instrumentos). Esta tarefa será englobada na tarefa T2.2.

2.3 Controlo da qualidade

A atividade no âmbito do controlo da qualidade também decorreu com sucesso e encontra-se documentada por algumas das publicações enumeradas na terceira secção deste relatório.

A tarefa 2.1, que consistia no estudo da qualidade posicional, foi circunscrita às posições obtidas com o GNSS de dupla frequência e antenas geodésicas referidas na atividade 3, análise das observações GNSS. Esta restrição justifica-se pelo facto de o GNSS ser um método relativamente recente na Geodesia Aplicada à monitorização de deslocamentos em obras de engenharia. Foram realizadas, no âmbito desta tarefa, as seguintes publicações decorrentes de comunicações a congressos [03], [04], [06], [08] e [09].

A tarefa 2.2, que consistia na comparação de instrumentos de medição, incidiu essencialmente na comparação de distanciómetros eletromagnéticos (DEM). Num relatório do projeto MEGA [15] apresenta-se uma metodologia para controlo dos erros instrumentais e avaliação da incerteza de medição dos distanciómetros eletromagnéticos (DEM) usados na observação geodésica de barragens de betão. A metodologia, que é baseada numa base de teste existente no *campus* do LNEC, é ilustrada com a análise de seis medições da base, entre 2010 e 2014, com os dois DEM utilizados pelo Núcleo de Geodesia Aplicada. Para a estimação dos desvios padrão são usados os conceitos Bayesianos apresentados em [14], resultantes da tarefa T1.3.

A comparação dos DEM dos taqueómetros com os teodolitos, isto é, da medição de distâncias com a medição de ângulos, é descrita no artigo “Combined Adjustment of Angle and Distance Measurements in a Dam Monitoring Network” [02], publicado na *Survey Review*. O processo de ajustamento conjunto de ângulos e distâncias fornece estimativas credíveis dos correspondentes desvios padrão. Este trabalho permitiu confirmar um facto que se vinha observando na prática: as distâncias têm uma qualidade superior aos ângulos.

2.4 Análise de observações GNSS

A atividade no âmbito da análise de observações GNSS também decorreu com sucesso e encontra-se documentada em várias publicações enumeradas na terceira secção deste relatório.

A tarefa 3.1, designada por séries temporais, incidiu essencialmente na análise das observações realizadas em estações GNSS permanentes. Inicialmente foi realizado em bases GNSS curtas, definidas por dois recetores de dupla frequência e antenas geodésicas, no *campus* do LNEC, como se descreve em [03], [05], [06] e [07]. Depois, já em obra, com o mesmo equipamento, foi feita em barragens de aterro [06], [08] e em barragens de betão [09]. Procurou-se estimar a incerteza do GNSS, em bases curtas, em função da duração das sessões de observação, de 5 minutos a 24 horas.

A tarefa 3.2, designada por caracterização do ruído, incidiu essencialmente nas séries temporais GNSS. Primeiro caracterizou-se o ruído das séries temporais realizadas em bases GNSS fixas, no campus do LNEC, definidas por dois recetores de dupla frequência e antenas geodésicas, como se refere em [03] e [05]. Depois, já em obra, na barragem do Feiticeiro, conforme se pode ver em [09], procurou-se avaliar a estabilidade temporal das bases, identificando a percentagem de erros de observação significativos.

A tarefa 3.3, designada por implementação de filtros, incidiu essencialmente na aplicação de filtros digitais, como a média móvel simples e a média móvel exponencial, tendo em vista a mitigação dos erros que mais afetam as observações GNSS, nomeadamente os erros devido ao *multipath* (reflexão de sinais). Primeiro, implementaram-se filtros na base GNSS do campus do LNEC, como se refere em [05] e [07]. Depois em obra, implementaram-se filtros na barragem do Feiticeiro, como se pode ver em [09].

A tarefa 3.4, designada por comparação de modelos, pretendia comparar diferentes modelos de interpretação quantitativa das séries GNSS em barragens de betão, usando indicadores tais como o critério de Schwarz e o fator de Bayes. A aplicação escolhida contemplou as bases GNSS da barragem do Feiticeiro. A tarefa ainda não foi concluída.

2.5 Outras atividades

Uma outra atividade não prevista no plano inicial consistiu na comparação de dois modelos numéricos de elementos finitos 3D da barragem do Cabril, um com fissuração simulada através de elementos de junta e o segundo sem fissuração. Os resultados destes dois modelos foram comparados com as observações GNSS em contínuo no topo da secção central. Os dois modelos foram desenvolvidos no âmbito duma tese de mestrado do ISEL, levada a efeito em colaboração com o LNEC [16].

Outra atividade, no âmbito da utilização de métodos estocásticos na observação de fundações de barragens de betão, foi levada a cabo ao abrigo do projeto MEGA. A partir de um caso de estudo baseado em amostras de dados resultantes da observação piezométrica de sistemas de drenagem de diversas barragens de betão e que se supõe resultar de uma mistura de variáveis beta, surgiu a oportunidade de testar o desempenho do EMA (Expectation Maximization Algorithm) na estimação de parâmetros de misturas de variáveis beta. A publicação seriada [11] proporciona o enquadramento teórico das misturas de variáveis beta e do EMA e apresenta os resultados da sua aplicação com sucesso ao caso de estudo.

2.6 Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2018-2019

A atividade desenvolvida no triénio 2015/2017 decorreu, no essencial, com sucesso e de acordo com o plano inicial do projeto, embora com algumas alterações do desenvolvimento temporal das tarefas.

Foi também realizada alguma atividade não prevista inicialmente no plano, relatada na subsecção 2.5.

Na atividade 1, “Análise Bayesiana”, as tarefas T1.2, T1.3 e T1.4 podem considerar-se concluídas, a tarefa T1.5 foi cumprida no âmbito da tarefa T2.2 e apenas a tarefa T1.1 necessita de prosseguimento. Parece também importante elaborar um texto com uma síntese das fórmulas mais importantes para a análise de modelos Gaussianos.

Na atividade 2, “Controlo da Qualidade”, a tarefa T2.2 pode considerar-se concluída e a tarefa T2.1 pode ser integrada na atividade 3, “Análise de Observações GNSS”. Deste modo, a atividade 2, “Controlo da Qualidade”, pode ser encerrada.

Na atividade 3, “Análise de Observações GNSS”, as tarefas T3.1, T3.2 e T3.3 podem considerar-se concluídas, apenas a tarefa T3.4 necessita de prosseguimento. São ainda de acrescentar duas novas tarefas, a primeira, que transita da atividade de “Controlo da Qualidade”, será a tarefa “Qualidade Posicional” (novo código T2.1). A segunda tarefa será “Análise Preditiva das Séries Temporais GNSS (código T2.2). A tarefa T3.4, “Comparação de Modelos”, será convertida na tarefa “Comparação de Modelos de Interpretação Quantitativa” (T2.3).

No Quadro 2.2 apresenta-se uma síntese da revisão do plano de trabalhos para 2018 e 2019, agora proposta, tendo em conta a atividade já realizada.

Quadro 2.2 – Plano de trabalhos para 2018 e 2019

Atividade	Tarefa
A1 – Análise Bayesiana	T1.1 – Regiões de credibilidade em cenário informativo
	T1.2 – Fórmulas mais importantes para a análise Bayesiana em modelos Gaussianos.
A2 – Análise de observações GNSS	T2.1 – Qualidade posicional
	T2.2 – Análise preditiva
	T2.3 – Comparação de modelos de interpretação quantitativa

3 | Divulgação de resultados

3.1 Publicações em livros, revistas e congressos

3.1.1 Edição de livros

[01] Casaca, J. (2015). **Bayesian Analysis: General Framework**. Saarbrücken, Lambert Academic Press.

3.1.2 Artigos em revistas internacionais

[02] Casaca, J. Braz, N., Conde, V. (2015). **Combined Adjustment of Angle and Distance Measurements in a Dam Monitoring Network**. Survey Review, vol. 47, nº 342.

3.1.3 Comunicações a congressos

[03] Casaca, J., Lima, J. N. (2016). **Análise Preditiva de uma Base GNSS Permanente**. IX Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Universidade Complutense de Madrid, Junho de 2016.

[04] Casaca, J., Conde, V. (2015). **Quantitative Interpretation of a Rock Mass Deformation Measurement**. Second International Dam World Conference, Lisboa, 21-24 de abril.

[05] Lima, J. N. (2016). **Mitigando o ruído das Séries Temporais GNSS**. IX Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Universidade Complutense de Madrid, Junho de 2016.

[06] Lima, J. N., Conde, V., Candeias, H. (2015). **Quality Assessment of GNSS with Short-length Sessions in the Displacement Measurement of a Large Embankment Dam**. Second International Dam World Conference, Lisboa, 21-24 de abril.

[07] Lima, J. N. (2015). **A Utilização de Filtros Digitais em Séries Temporais GNSS**. Oitava Conferência Nacional de Geodesia e Cartografia, Lisboa, 29 e 30 de outubro.

][08] Lima, J. N. (2015). **Monitorização de Deslocamentos em Barragens de Aterro com o GNSS**. Oitava Conferência Nacional de Geodesia e Cartografia, Lisboa, 29 e 30 de outubro.

[09] Lima, J. N., Casaca, J. (2017). **A Bayesian Procedure for the Analysis of Short Permanent GNSS Baselines**. INGEO, 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, 18-20 de outubro.

3.1.4 Série Informação Científica e Relatórios

[11] Casaca, J., Pereira, R. (2017). **Parametric Inference in the Context of Beta Mixtures**. LNEC, série ICT, INCB24.

[12] Casaca, J. (2016). **Bayesian Analysis of Multivariate Normal Data**. LNEC, série ICT, INCB23.

[13] Casaca, J. (2016). **Information and Entropy in Bayesian Analysis**. LNEC, série ICT, INCB22.

[14] Casaca, J. (2015). **A Distribuição do Desvio Padrão Empírico**. LNEC, série ICT, INCB21.

[15] Casaca, J., Henriques, M. J., Conde, V., Candeias, H. (2015). **A Incerteza de Medição dos Distanciómetros Eletromagnéticos usados na Observação Geodésica de Barragens**. LNEC, relatório do projeto MEGA, 47/2015 – DBB/NGA.

3.2 Teses de mestrado

[16] Rodrigo de Sousa Morais (2017). **Monitorização de Deslocamentos de Grandes Barragens Utilizando o GNSS**. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Co-orientador: IA José Nuno Lima.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho

No Quadro 4.1 apresentam-se alguns dos indicadores de desempenho do projeto, os seus valores totais previstos na ficha inicial e os já realizados em 2015-2017.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado em 2015-2017 (3 anos)	Total previsto no projeto (5 anos)
Edição de livros	1	0
Capítulos de livros	0	0
Artigos em revista internacional	2	4
Artigos em revista nacional	0	2
Publicações seriadas	4	0
Comunicações em congresso	7	4
Teses de mestrado	1	0

4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetados ao projeto, em percentagem do tempo total de trabalho, no triénio 2015-2017, e a percentagem prevista na ficha de projeto para o quinquénio 2015-2019.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho	
		Realizado em 2015-2017 (3 anos)	Total previsto no projeto (5 anos)
João Casaca	Investigador-coordenador	60%	50%
Maria João Henriques	Investigador Principal	5%	10%
José Nuno Lima	Investigador Auxiliar	40%	30%
Nádia Braz	Bolseira de Experimentação	5%	10%

4.3 Aplicação a trabalhos de contrato

Os estudos levados a cabo no projeto constituem uma contribuição importante para o planeamento dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e para o processamento e controlo da qualidade das medições. Destacam-se: i) o desenvolvimento de uma metodologia para a comparação de distanciómetros eletromagnéticos e para o ajustamento conjunto de ângulos e distâncias; ii) o estudo de regiões de credibilidade Bayesianas em contraponto às tradicionais elipses de confiança; iii) o desenvolvimento de métodos de suavização (*smoothing*) das séries temporais GNSS baseados em filtros numéricos.

Os estudos referidos têm aplicação nos trabalhos por contrato realizados, no âmbito da observação de barragens de betão. Deverá notar-se que muitos destes conceitos foram utilizados no planeamento dos sistemas de observação geodésica de barragens recentemente construídas, nomeadamente as barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro e Alto Ceira II.

5 | Considerações finais

O projeto MEGA engloba um conjunto de atividades e tarefas cujo denominador comum é a utilização de métodos estocásticos na resolução de problemas da Geodesia Aplicada, em particular a que se relaciona com a monitorização de deslocamentos de grandes barragens de betão.

No projeto MEGA, a análise Bayesiana é privilegiada relativamente à análise frequencista tradicional. Algumas das aplicações mais interessantes desenvolvidas nos estudos do projeto foram: i) o desenvolvimento de regiões de credibilidade para os resultados da observação geodésica; ii) o desenvolvimento da análise preditiva posterior das séries temporais GNSS.

Embora o projeto tenha atingido no primeiro triénio um elevado nível de execução, importa prosseguir os estudos em alguns subtemas, em particular os que se relacionam com as séries temporais GNSS, tal como se propõe na secção 2.6.

Importa acentuar que o projeto MEGA é subsidiário das atividades de contrato do LNEC na monitorização de deslocamentos em grandes barragens de betão. Nestas condições, os custos do projeto incidem essencialmente no custo dos meios humanos envolvidos nos estudos, sendo os dados e os instrumentos de medição providenciados pelas atividades contratadas pelo LNEC.

Lisboa, LNEC, fevereiro de 2018

VISTOS

AUTORIA

A Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada

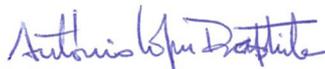


Ana Maria Fonseca



João Manuel Martins Casaca
Investigador-Coordenador

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



António Lopes Batista



José Nuno Lima
Investigador Auxiliar

