



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA

**Relatório de avaliação final do projeto
do P21/LNEC 2013 – 2020**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA

**Relatório de avaliação final do projeto
do P2I/LNEC 2013 – 2020**

Lisboa • dezembro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 429/2023 – **DBB/NGA**

Título

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODÉSIA APLICADA

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013 – 2020

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

José Nuno dos Reis Pedroso de Lima

Investigador Principal, 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 429/2023

Proc. 0404/1102/19619

MEGA – MÉTODOS ESTOCÁSTICOS EM GEODESIA APLICADA

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013 – 2020

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto MEGA no período 2015-2023. Os resultados da atividade são analisados e avaliados, em face dos objetivos inicialmente previstos.

Palavras-chave: MEGA / Análise Bayesiana / GNSS / Séries temporais

MEGA - STOCHASTIC METHODS IN APPLIED GEODESY

Final assessment report of the P2I/LNEC 2013 – 2020 project

Abstract

A concise description is presented of the research activities undertaken in the MEGA project during the period 2015-2023. The results are analysed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: MEGA / Bayesian analysis / GNSS / Time series

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	2
2.1	Plano de trabalho inicial.....	2
2.2	Análise Baeyiana.....	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.....	5
3	Divulgação dos resultados	7
3.1	Publicação 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.....	9
3.2	Teses de mestrado	9
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	10
4.1	Indicadores de desempenho.....	10
4.2	Recursos humanos mobilizados	10
4.3	Aplicações a trabalhos de contrato	11
5	Considerações finais	12
	ANEXOS.....	15
	ANEXO I Ficha inicial do projeto MEGA	17
	ANEXO II Plano de trabalhos do projeto MEGA após proposta em 2018 de revisão e extensão.....	27

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Atividades e tarefas previstas no plano trabalho inicial	2
Quadro 2.2 – Plano de trabalhos executado no período 2018 - 2023.....	6
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	10
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC.....	11

1 | Introdução

O projeto de investigação MEGA (Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada) teve início formal em 2015/01/01 e foi finalizado em 2023/09/31. O projeto foi integrado no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC e teve 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 foi constituída por investigadores e técnicos do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) do Departamento de Barragens de Betão (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%), IP José Nuno Lima, que passou a ser o investigador responsável em dezembro de 2016 (30%), BE Nádia Braz (10%) e BE Vasco Conde, que cessou a atividade no LNEC em março de 2015.

O IP 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, até meados de 2019, altura em que cessou a colaboração com o LNEC por motivo de doença.

O projeto MEGA enquadrou 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 pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (posições relativas medidas com o GNSS).

No Anexo I apresenta-se a ficha inicial do projeto MEGA e no Anexo II consta o plano de trabalhos do projeto após proposta em 2018 de revisão e extensão.

Este relatório apresenta o trabalho realizado no período 2015-2023, considerando as atividades e tarefas inicialmente previstas. O projeto MEGA estendeu-se até ao fim do mês de setembro de 2023, devido ao atraso na implementação da Estratégia de Investigação e Inovação E2I 21-27.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Plano de trabalho inicial

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 – Atividades e tarefas previstas no 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 anos seguintes, de modo a permitir a inclusão de outras tarefas no âmbito do projeto, que se afiguraram como importantes. Nos últimos anos, a atividade do projeto concentrou-se mais na finalização de algumas publicações relacionadas com as tarefas previstas nos primeiros anos do projeto.

2.2 Análise Baeynsiana

A atividade no âmbito da análise Bayesiana decorreu com sucesso e encontra-se documentada por várias publicações enumeradas no terceiro capítulo 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 Review¹. 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 [27], 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 [24]. 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, também, apresentados na publicação seriada [24]. 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; e 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 (A distribuição do desvio padrão da amostra) e T2.2 (Comparação de Instrumentos). Esta tarefa foi englobada na tarefa T2.2.

¹ À data deste relatório o artigo ainda não tinha sido publicado, prevendo-se que dificilmente seja publicado devido à perda de contacto do primeiro autor com os editores. No entanto, foi contactado o coautor do artigo, Vasco Conde, que referiu nada saber sobre o estado da submissão do referido artigo.

2.3 Controlo da qualidade

A atividade no âmbito do controlo da qualidade também decorreu com sucesso e encontra-se documentada em algumas das publicações enumeradas no terceiro capítulo 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 comunicações a congressos [04], [05], [06], [07], [08], [09] e [12].

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 [25] 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 [24], 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 no terceiro capítulo 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], [04], [07], [08] e [11]. Depois, já em obra, com o mesmo equipamento, foi feita em barragens de aterro [07], [09] e em barragens de betão [12]. 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 [04] e [11]. Depois, já em obra, na barragem do Feiticeiro, conforme se pode ver em [12],

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 [08] e [11]. Depois em obra, implementaram-se filtros na barragem do Feiticeiro, como se pode ver em [12].

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 não foi integralmente 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 [31].

Igualmente não prevista no plano inicial, foi a colaboração nos trabalhos da tese de doutoramento da Eng.^a Dora Roque, nomeadamente na comparação de deslocamentos medidos com InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) com deslocamentos medidos com o GNSS, quer no campus do LNEC, quer na barragem do Baixo Sabor, dando origem a uma publicação em revista [04] e a duas comunicações em congressos.

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 [28] 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 [03].

2.6 Apreciação da atividade desenvolvida

A atividade desenvolvida no período 2015/2023 decorreu, no essencial, com sucesso e de acordo com o plano inicial do projeto, embora com algumas alterações do desenvolvimento temporal das

tarefas, também de acordo com a revisão do plano de atividades do MEGA a partir de 2018. 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 necessitaria 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 foi considerada concluída e a tarefa T2.1 acabou por ser integrada na atividade 3, “Análise de observações GNSS”. Deste modo, a atividade 2, “Controlo da qualidade”, foi concluída.

Na atividade 3, “Análise de observações GNSS”, as tarefas T3.1, T3.2 e T3.3 foram consideradas concluídas, apenas a tarefa T3.4 necessitaria de prosseguimento. A partir de 2018, foram ainda acrescentadas duas novas tarefas, a primeira, que transitava da atividade de “Controlo da qualidade”, ficou a tarefa “Qualidade posicional” (novo código T2.1). A segunda tarefa ficou “Análise preditiva das séries temporais GNSS (código T2.2). A tarefa T3.4, “Comparação de modelos”, seria 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 a partir de 2018 até ao final do projeto, tendo em conta a atividade então realizada nos três primeiros anos do projeto. Todas estas tarefas foram integralmente concluídas, exceto a tarefa T1.2 (Fórmulas mais importantes para a análise Bayesiana em modelos Gaussianos), em que faltou compilar as fórmulas numa publicação.

Quadro 2.2 – Plano de trabalhos executado no período 2018 - 2023

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 dos resultados

3.1 Publicação 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.

[03] Pereira, Renato, António Lopes Batista, Luís Canhoto Neves & João Martins Casaca (2021). A priori uplift pressure model for concrete dam based on piezometric monitoring data. Sstructure and Infrastructure Engineering, vol. 17, nº 11, 1523-1534, 2021.

[04] Roque, Dora, José Nuno Lima, Daniele Perissin, Ana Paula Falcão, José V. Lemos, Ana Maria Fonseca (2021). Integrated InSAR and GNSS monitoring sub-system for an arch dam reservoir banks. Journal of Surveying Engineering, volume 147, issue 3, August 2021.

[05] Rodrigues, Miguel, Sérgio Oliveira & José Nuno Lima (2021). Displacement monitoring in Cabril Dam using GNSS. Atas do 4th International Dam World Webinar (Dam World 2020 Webinar). Portugal, Lisboa, 22 a 24 de setembro 2020. Premiada como "Best Junior Video Presentation", Dam Engineering Journal, volume XXXI, Issue 3, 2021.

3.1.3 Comunicações a congressos

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

[07] 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.

[08] 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.

[09] 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.

[10] 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.

- [11] 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.
- [12] Lima, J. N., Casaca, J. (2017). A Bayesian Procedure for the Analysis of Short Permanent GNSS Baselines. INGENEO, 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, 18-20 de outubro.
- [13] Lima, J. N. e Casaca, J. (2018). Monitoring dam displacements with GNSS: Strategy, accuracy, and benefits. Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.
- [14] Morais, Rodrigo, Sérgio Oliveira e José Nuno Lima (2018). Use GNSS for measuring displacements in Cabril arch dam. Comparison with plumb lines, geodetic measurements, and 3DFEM results. Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.
- [15] Rodrigues, Miguel, Sérgio Oliveira e José Nuno Lima (2018). Monitoring and analysis of concrete dam behaviour taking into account swelling effects – DAMSAFE 3.0: separation of effects and 3D FE models. Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.
- [16] Lima, J. N. e Casaca, J. (2018). O GNSS na monitorização de deslocamentos de barragens de betão portuguesas. Atas da IX Conferência Nacional de Geodesia e Cartografia. Ordem dos Engenheiros, Amadora, Academia Militar, 25 e 26 de outubro de 2018.
- [17] Morais, Rodrigo, Sérgio Oliveira e José Nuno Lima (2018). Monitorização de deslocamentos em grandes barragens utilizando GNSS. Aplicação à barragem do Cabril. Atas do Encontro Nacional de Betão Estrutural 2018. Lisboa, LNEC, 7 a 9 de novembro de 2018.
- [18] Lima, J. N. (2018). Observações de deslocamentos em grandes barragens com o GNSS. Comunicação apresentada no 2º Fórum de Informação Geoespacial, Instituto Politécnico da Guarda, 21 de novembro de 2018, Auditório da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Guarda.
- [19] Roque, D., Morais, J., Falcão, A.P., Lima, J.N., Perissin, D., Morais, P., Catalão, J., Lemos, J.V., Fonseca, A.M. (2019). Precision assessment of PSI displacements at a corner reflector infrastructure for Sentinel-1. Atas do Living Planet Symposium 2019, Milão, Itália, 13 a 17 de maio de 2019.
- [20] Roque, D., Morais, J., Falcão, A.P., Lima, J.N., Perissin, D., Morais, P., Catalão, J., Lemos, J.V., Fonseca, A.M. (2019). Validation of PSI displacements at a bidirectional corner reflector. Atas do Colloque G2 2019 Géodésie & Géophysique, Le Mans, França, 20 a 22 de novembro de 2019.
- [21] Lima, J. N. (2020). Using spectra analysis of Cabril dam GNSS monitoring system time series for detecting periodic displacements. Atas do 4th International Dam World Webinar (Dam World 2020 Webinar).
- [22] Lima, José Nuno (2022). GNSS na monitorização em tempo real do comportamento estrutural de grandes obras. 6ªs jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão estrutural 2022 e 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, LNEC, Lisboa, 9 a 11 de novembro de 2022, 1941-1956.

[23] Rodrigues, Miguel, José Nuno Lima, Sérgio Oliveira & Jorge Proença (2023). Structural health monitoring of large dams using GNSS and HSCT-FE models. Swlling Effect detection. 12th ICOLD Europeans Club Symposium 2023, Interlaken, 5 a 8 de setembro de 2023, Suíça.

3.1.4 Série Informação Científica e Relatórios

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

[25] 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.

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

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

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

[29] Lima, José Nuno (2018). Barragem do Feiticeiro. Resultados da medição de deslocamentos entre maio de 2016 e dezembro de 2017. LNEC, Relatório 78/2018 – DBB/NGA, março de 2018.

[30] Lima, José Nuno (2018). Barragem do Baixo Sabor. Resultados da medição de deslocamentos entre maio de 2016 e dezembro de 2017. LNEC, Relatório 222/2018 – DBB/NGA, junho de 2018.

3.2 Teses de mestrado

[31] 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: IP 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 realizados em 2015-2023.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado em 2015-2023 (9 anos)	Total previsto no projeto (4 anos)
Edição de livros	1	0
Artigos em revista internacional	4	4
Artigos em revista nacional	0	2
Publicações seriadas	7	0
Comunicações em congresso	18	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 período 2015-2023, 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 2015-2023 (9 anos)	Total previsto no projeto (4 anos)
João Casaca	Investigador-coordenador	12 (11%)	24 (50%)
Maria João Henriques	Investigador Principal	2,4 (2,2%)	4,8 (5%)
José Nuno Lima	Investigador Auxiliar	30 (27,7%)	14,4 (30%)
Nádia Braz	Bolseira de Experimentação	2,4 (2,2%)	4,8 (5%)

4.3 Aplicações 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; e 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 geodésica 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 englobou um conjunto de atividades e tarefas cujo denominador comum foi 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 foi 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; e ii) o desenvolvimento da análise preditiva posterior das séries temporais GNSS.

Embora o projeto tenha atingido, no primeiro triénio, um elevado nível de execução, na parte final do projeto prosseguiram-se os estudos em alguns subtemas, em particular os que se relacionam com as séries temporais GNSS, tal como se expôs na secção 2.6.

Importa acentuar que o projeto MEGA foi 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, dezembro de 2023

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada



Maria João Henriques

AUTORIA



José Nuno Lima
Investigador Principal

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



António Lopes Batista

ANEXOS

ANEXO I

Ficha inicial do projeto MEGA

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação	Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada (MEGA)
Acrónimo	MEGA
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	NGA
Investigador Responsável	João Casaca (LNEC)
Duração (meses)	48
Data de início (ano-mês-dia)	01/01/2015

1.2 Inserção na matriz programática da E2I (indicar par(es) (Eixo programático, Temática prioritária))

Par principal (obrigatório)	E1, T3; E4, T3
Par secundário (opcional)	

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora	LNEC
Parceiros internos	
Parceiros externos	
Entidade externa interessada	EDP
Financiamento externo (S/N)	N

1.4 Resumo

(max. 300 palavras)

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

Referências Bibliográficas:

- Barnett, V. (1999). **Comparative Statistical Inference**, 3rd ed. New York: John Wiley.
- Berger, J. (2010). **Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis**, 2nd ed. New York, Springer.
- Bretthorst, G. (1988). **Bayesian Spectrum Analysis and Parameter Estimation**. Berlin: Springer.
- Casaca, J. (2011). **Introdução à Análise Bayesiana**. LNEC, Série ICT, INCB16.
- Casaca, J.; Mateus, P. e Coelho, J. (2011). **Bayesian Estimation in Dam Monitoring Networks**. Journal of Civil Engineering and Architecture, vol. 5, n^o 2.
- Casaca, J. (2012a). **Análise de Regressão Multivariada: Uma perspetiva Bayesiana**. LNEC, Série ICT, INCB18.
- Casaca, J. (2012b). **Uma estratégia Bayesiana para a Comparação de Modelos Alternativos em Análise de Regressão Linear Multivariada**. RPEE, Série II, n^o 12.
- Casaca, J. (2013). **A Resolução de Problemas Mal Colocados na Observação Geodésica de Barragens**. LNEC, Série ICT, INCB20.
- Lima, J. N. e Casaca, J. (2012). **Smoothing GNSS Time Series with Asymmetric Simple Moving Averages**. Journal of Civil Engineering and Architecture, vol. 6, n^o 6.

2 - Fundamentação

(síntese do estado da arte, identificação de problemas por resolver, motivações internas e/ou externas)

A introdução recente de nova instrumentação de observação na monitorização de deslocamentos de barragens por métodos geodésicos, nomeadamente, taqueómetros motorizados e estações permanentes GNSS, veio tornar necessário o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais de planeamento dos sistemas de observação, de controlo de qualidade das observações e de processamento dos dados. O projecto MEGA pretende cobrir uma gama de actividades que vão da comparação de instrumentos à criação de modelos para a interpretação das observações com estações permanentes GNSS.

As motivações para a realização deste projeto são:

- promover a utilização deste tipo de dados cuja aquisição é suportada pelos contribuintes europeus e que deve ser colocada pela comunidade científica ao seu serviço; contribuir para a operacionalização de uma tecnologia espacial de monitorização temporal de infraestruturas.

3 - Objetivos

(indicar para além dos objetivos científicos do projeto, os objetivos do investigador responsável e das entidades envolvidas)

O projeto MEGA, que se encontra inserido na área genérica da exploração de dados (data mining), destina-se a enquadrar o estudo e aplicação das metodologias de análise estatística convencional frequencista e a sua generalização Bayesiana (Barnett, 1999) aos metadados e aos dados resultantes dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e alvenaria portuguesas.

O projeto MEGA tem uma vertente teórica que contempla, entre outras iniciativas, o desenvolvimento de expressões analíticas para funções densidade de probabilidade (FDP) anteriores (informativas e não informativas), FDP posteriores conjuntas e FDP posteriores marginais dos parâmetros (Berger, 2010) em: i) problemas inversos lineares ou linearizados por Taylorização (Casaca, 2013); ii) modelos Gaussianos de regressão linear multivariada (Casaca, 2012a); e iii) modelos Gaussianos de análise multivariada. A vertente aplicativa do projeto MEGA estará concentrada nos problemas associados à monitorização de grandes barragens de betão e alvenaria por métodos da Geodesia Aplicada.

4 - Contribuições inovadoras

(indicar as contribuições para o reforço dos conhecimentos, das competências e/ou dos recursos experimentais do LNEC)

O potencial de inovação do projeto reside, em primeiro lugar, na aplicação de conceitos teóricos da Análise Bayesiana, já estabelecidos, a outras áreas científicas e tecnológicas, nomeadamente à formulação e resolução de problemas práticos da Geodesia Aplicada à monitorização de barragens de betão. Alguns dos resultados do projeto MEGA poderão ser utilizados por outros sectores do LNEC, nomeadamente o DBB/NO, no tratamento dos dados da observação de barragens.

5 - Metodologia

(descrição da abordagem e dos métodos teóricos e/ou experimentais a utilizar)

Serão usados os métodos teóricos de *Data Mining*, incluindo a Análise Bayesiana, aplicados a dados experimentais resultantes da observação geodésica de barragens.

6 - Plano de Trabalhos

Atividade	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	1º S	2º S	3º S	4º S	5º S	6º S	7º S	8º S
Atividade 1	Análise Bayesiana	T1.1	Comparação de instrumentos								
		T1.2	Regiões de erro								
		T1.3	Entropia e divergência de Kullback-Leibler								
		T1.4	A distribuição do desvio padrão da amostra								
		T1.5	Análise multivariada								
Atividade 2	Controlo da Qualidade	T2.1	Qualidade posicional								
		T2.2	Comparação de instrumentos								
Atividade 3	Análise de Observações GNSS	T3.1	Séries temporais								
		T3.2	Caracterização do ruído								
		T3.3	Implementação de filtros								
		T3.4	Comparação de Modelos								

7 - Equipa de trabalho				
Nome	Função	Setor/Entidade	Tarefas	Afetação ao projeto (%)
João Manuel Martins Casaca	Investigador-coordenador	DBB/NGA	T1.1 a T1.5; T2.1, T2.2	50%
Maria João Henriques	Investigadora Principal	DBB/NGA	T2.1, T2.2	10%
José Nuno Pedroso Lima	Investigador	DBB/NGA	T3.1 a T3.4	30%
Nádia Braz	Bolseira experimentação	DBB/NGA	T1.1, T1.2	10%
Vasco Conde	Bolseiro experimentação	DBB/NGA	T1.1 a T1.5	30%

8 - Resultados expectáveis

Resultados por atividade/tarefa	Descrição
<i>(descrever os resultados esperados por atividade e/ou tarefas)</i>	
Atividade 1	Contribuição importante, no que diz respeito ao planeamento dos sistemas e ao controlo da qualidade das medições, para o aperfeiçoamento dos métodos geodésicos para a observação geodésica de barragens de betão.
Atividade 2	Contribuição importante, no que diz respeito ao controlo de qualidade e à comparação de instrumentos de medição, para o aperfeiçoamento dos métodos geodésicos para a observação geodésica de barragens de betão.
Atividade 3	Contribuição importante, no que diz respeito à utilização de estações permanentes GNSS, para o aperfeiçoamento dos métodos geodésicos para a observação geodésica de barragens de betão.

Outros resultados	Quantidade
Teses	
<i>mestrado</i>	
<i>doutoramento</i>	
<i>outras</i>	

Artigos em revista	
<i>nacional</i>	2
<i>internacional</i>	4

Comunicações	4
--------------	---

Outros produtos	
Publicações seriadas do LNEC	4
Relatórios de I&D do LNEC	2

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor €
1	24.00	126 640.00
2	14.40	69 680.00
3	0.00	0.00
4	0.00	0.00
<i>TOTAL</i>	38.40	196 320.00

10 - Despesas correntes

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
<i>TOTAL</i>			0.00

11 - Equipamento

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
<i>TOTAL</i>			0.00

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo €	Financiamento externo €	Financiamento LNEC €
Recursos Humanos	196 320		196 320
Despesas Correntes	0		0
Equipamentos	0		0
Gastos gerais	196 320		196 320
			0
			0
Total	392 640	0	392 640

ANEXO II

Plano de trabalhos do projeto MEGA após proposta em 2018 de revisão e extensão

6 - Plano de Trabalhos

				2018		2019	
	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa				
Atividade 1	Análise Bayesiana	T1.1	Regiões de credibilidade em cenário informativo				
		T1.2	Fórmulas mais importantes para a análise Bayesiana em modelos Gaussianos				
Atividade 2	Análise de Observações GNSS	T2.1	Qualidade posicional				
		T3.2	Análise preditiva				
		T3.3	Comparação de modelos de interpretação quantitativa				



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt