DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DE MOVIMENTO DE MASSA PARA A SERRA DA GRACIOSA - PR (PROJETO SIMGRACIOSA)

Karollyn Larissa de Quadros[1]; Maria Fernanda Dames dos Santos Lima[2]; Danieli Mara Ferreira [3]; José Eduardo Gonçalves [4] ; Luiz Fernando G. Grodzki[5] ; Cesar Augusto Cabral Franco[6]; Heitor Cardoso Fernandes [7]; Elaine Cristina Koutton[8] ; Alisson Dalto de M. Souza[9] & Manuel Marrão Neto[10]

Palavras-Chave – Instrumentação Geotécnica, Deslizamento de Massa, Sistema de Alerta Operacional.

INTRODUÇÃO

O Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR), instituição de ciência e tecnologia vinculada à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SEDEST), atua no monitoramento de riscos ambientais. O projeto SimGraciosa foi desenvolvido juntamente ao Departamento de Estradas de Rodagem (DER-PR) e implantou uma infraestrutura dedicada a mitigar os riscos de deslizamento no trecho crítico de 11 km da Serra da Graciosa (PR-410) operada pelo DER-PR, conforme apresentado na Figura 1.

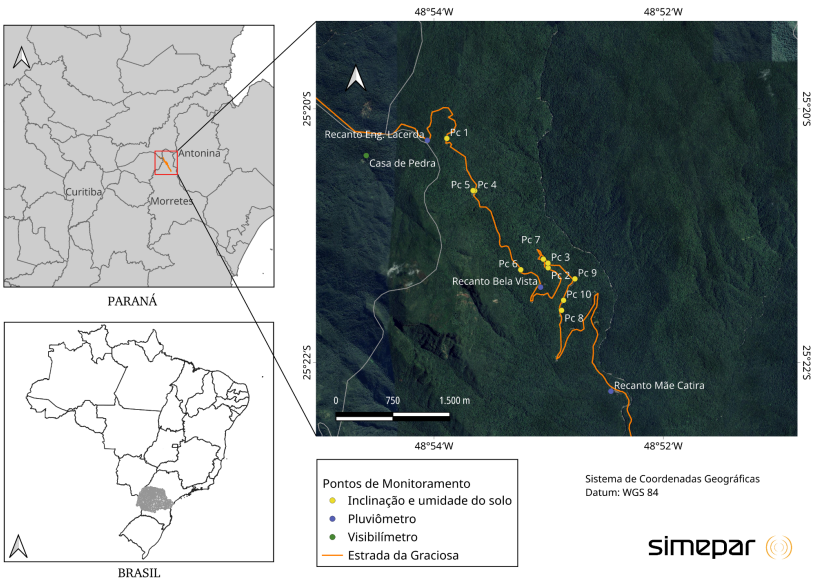


Figura 1. Localização da região de estudo na Serra da Graciosa, Município de Morretes, PR.

[1] Afiliação: Simepar/UFPR, karollyn.quadros@simepar.br
[2] Afiliação: Simepar/UFPR, maria.dames@simepar.br
[3] Afiliação: Simepar, danieli.ferreira@simepar.br
[4] Afiliação: Simepar, jose.eduardo@simepar.br
[5] Afiliação: Simepar, luiz.grodzki@simepar.br
[6] Afiliação: Simepar, cesar.franco@simepar.br
[7] Afiliação: Simepar/UFPR, heitor.fernandes@simepar.br
[8] Afiliação: DER-PR, elainekoutton@der.pr.gov.br
[9] Afiliação: DER-PR, alissonmendonca@der.pr.gov.br
[10] Afiliação: DER-PR, manuelneto@terceiros.der.pr.gov.br

Para suprir a escassez de dados meteorológicos na encosta, o SIMEPAR implantou na área serrana uma rede telemétrica com três estações pluviométricas, um visibilímetro e dez estações de monitoramento do solo nos pontos críticos (PCs) da estrada (Figura 2). As estações dos PCs são equipados com instrumentação própria, incluindo inclinômetros, sensores de umidade do solo e fibra óptica, projetada pelo SIMEPAR para monitorar continuamente a estabilidade do terreno.

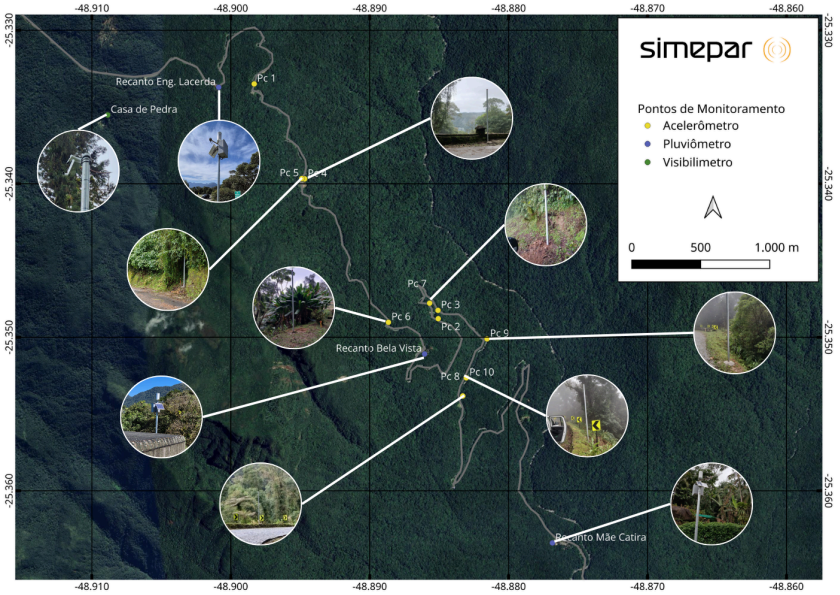


Figura 2. Distribuição espacial das estações de monitoramento instaladas na Serra da Graciosa-PR.

A integração de sensores distribuídos, unidades microcontroladas, comunicação sem fio, uma plataforma remota de armazenamento e visualização de dados caracteriza uma aplicação de Internet das Coisas (IoT). Esse tipo de arquitetura vem sendo utilizado em sistemas de monitoramento e alerta de movimentos de massa por permitir a aquisição contínua de variáveis geotécnicas e ambientais em locais de difícil acesso, com transmissão remota dos dados para sistemas de apoio à decisão (Wang et al., 2022; Esposito et al., 2022).

METODOLOGIA

Monitoramento e Infraestrutura de Rede

O principal desafio do projeto está na baixa comunicação da região, marcada pela ausência de rede de internet e pelo bloqueio de sinal imposto tanto pelo alto relevo quanto pela densa cobertura vegetal. Para contornar essas barreiras físicas, a transmissão de dados dos PCs é centralizada via rádio LoRa. Devido às demandas energéticas e logísticas locais, as estações operam de formas distintas: o Recanto Mãe Catira possui pluviômetro, sensor de precipitação, autônomo e foca a centralização dos dados dos PCs e envia via internet StarLink, alimentada pela concessionária local (Copel) (Figura 3a)). As estações pluviométricas Recanto Engenheiro Lacerda e Recanto Bela Vista operam de modo totalmente autônomo. A estação Casa de Pedra utiliza energia da concessionária para alimentar o visibilímetro, sensor óptico que mede a perda de visibilidade causada por neblina densa, (Figura 3a)). Visando mitigar o vandalismo e o impacto visual, as estações dos PCs, de monitoramento de solo, foram compactadas utilizando

microcontroladores de baixo consumo alimentados por baterias e pequenos painéis fotovoltaicos (Figura 3c) e Figura 4a) e b)). Estas unidades integram o sensor capacitivo, que monitora a variação do teor de umidade do solo (saturação da encosta), e o acelerômetro, que detecta variações angulares e inclinações físicas do terreno decorrentes de movimentação de terra.

Desde a sua implementação, o projeto permite que a equipe de plantão do SIMEPAR emita alertas diretos ao DER, garantindo a segurança das frentes de manutenção na Serra. A rede telemétrica opera em alta frequência, transmitindo dados de pluviômetros (15 min), visibilímetros (10 min) e dos PCs (5 min). Para centralizar essas informações, a plataforma web desenvolvida pelo Simepar (https://clientes.simepar.br/simgraciosa/) disponibiliza um módulo público e uma área restrita ao DER, que emite notificações automáticas baseadas nos limiares de criticidade a primeiro instante, da literatura pela CPRM/IPT (Bitar, 2014).

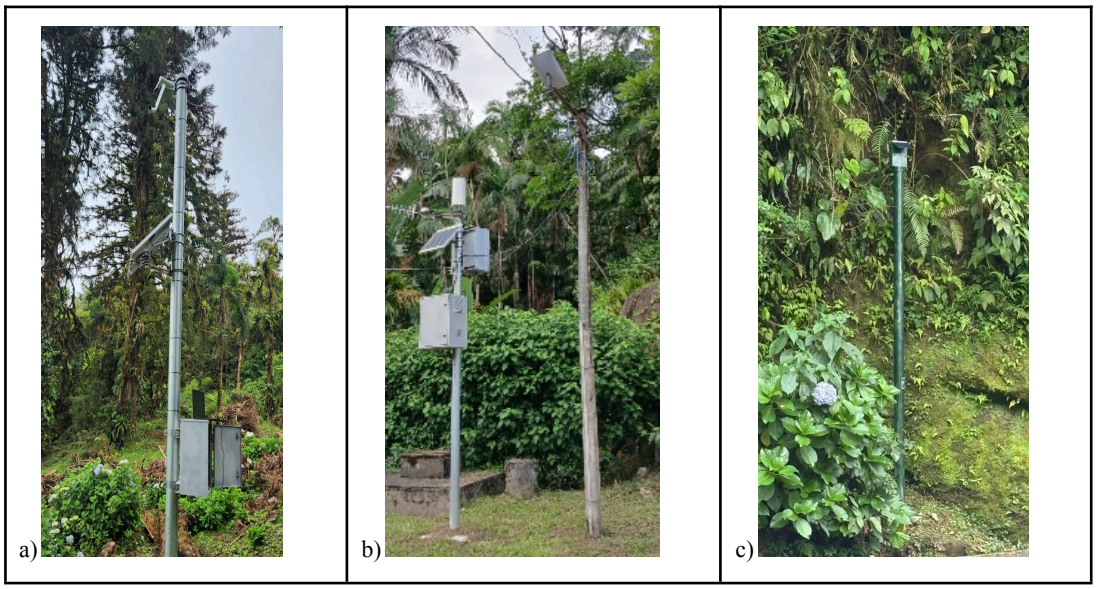


Figura 3. Estações a) Visibilimétrica; b) Pluviométrica; c) Monitoramento de solo.

Complementando a rede, um cabo de fibra óptica foi enterrado a 20 cm de profundidade e estaqueado a cada 3 metros ao longo dos trechos entre os PCs. O monitoramento baseia-se na interrupção do feixe luminoso em caso de ruptura física do cabo, sinalizando instantaneamente a ocorrência e a localização de um deslizamento de massa.

Estrutura Física, Rotinas e Calibração dos Equipamentos

As estações possuem suporte customizado (Figura 4b), integrando o microcontrolador ESP32, acelerômetro e inclinômetro com filtro de Kalman, e sensor capacitivo de umidade (Figura 4c)) calibrado em laboratório. O sistema é alimentado por seis baterias EVE INR 18650 associadas a mini painéis solares de 6V (500mA) via reguladores *step-down*. Para preservar a autonomia, o *firmware* mantém o ESP32 em *light sleep*, despertando a cada 5 minutos em blocos sincronizados. Usando os dois núcleos do chip, o circuito mede a inclinação, umidade e tensão da bateria, transmitindo via LoRa em janelas reservadas (slots TDMA). Para contornar a falta de visada direta na topografia, utilizam-se antenas de fibra de vidro de 50 cm que operam por reflexão do sinal nas

montanhas, com sensibilidade de recepção ampliada para -135dBm. Após a confirmação do *gateway*, o sistema retorna ao baixo consumo. A manutenção periódica envolve limpeza dos painéis, checagem das baterias e substituição de componentes desgastados pela severa umidade local.

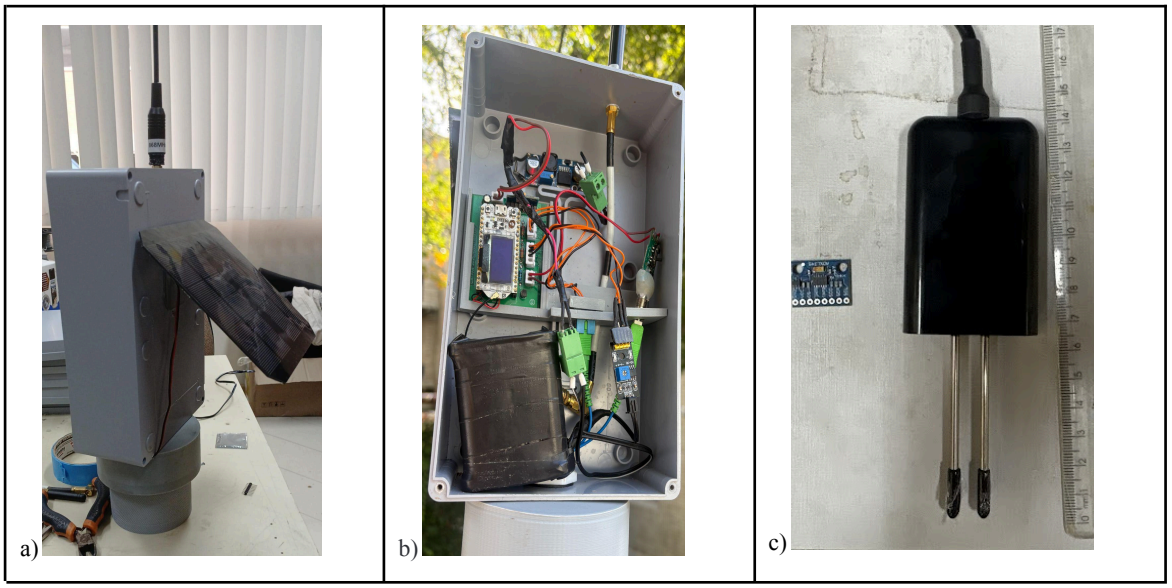


Figura 4. Estrutura das estações de solo. a) Suporte com painel solar; b) Estrutura interna da estação; c) Sensores de inclinação (esquerda) de umidade (direita).

CONCLUSÕES

O projeto SimGraciosa validou com sucesso um sistema telemétrico inovador de monitoramento de encostas, superando as barreiras geográficas e de comunicação da Serra da Graciosa. A integração dos sensores desenvolvidos, da comunicação telemétrica e da plataforma web em uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT) permitiu a aquisição remota e contínua dos dados e a automação de alertas, contribuindo para a mitigação dos riscos associados aos movimentos de massa. Em constante refinamento operacional, o modelo demonstra confiabilidade técnica e potencial de escalabilidade para outras rodovias e regiões vulneráveis.

REFERÊNCIAS

BITAR, O. Y. (Coord.). “Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000: nota técnica explicativa”. São Paulo: IPT; Brasília, DF: CPRM, 2014. (Publicação IPT, 3016).

WANG, C.; GUO, W.; YANG, K.; WANG, X.; MENG, Q. Real-Time Monitoring System of Landslide Based on LoRa Architecture. *Frontiers in Earth Science*, v. 10, 899509, 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.899509.

ESPOSITO, M.; PALMA, L.; BELLI, A.; SABBATINI, L.; PIERLEONI, P. Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review. *Sensors*, v. 22, n. 6, 2124, 2022. DOI: 10.3390/s22062124.

AGRADECIMENTOS

Ao DER-PR, pela parceria institucional, confiança técnica e pelo fornecimento de dados e suporte de campo essenciais para o mapeamento e validação das áreas críticas na Serra da Graciosa.