



ARTIGO DE REVISÃO

As trincheiras paleossismológicas, uma nova experiência para as geociências em Cuba

Paleoseismological trenches, a new experience for geosciences in Cuba

Díaz Barrios I. R.^{1*}, Arango Arias E. D.¹, González Matos O. F.¹, García Pérez P. L.^{2,3} e Iribarren Modejar J.^{2,3}

¹ Centro Nacional de Pesquisas Sismológicas - CENAI, Ministério da Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente - CITMA. Rua 17 No61 el 4 e 6. Bairro Vista Alegre. Santiago de Cuba, Cuba. CP 90400;

² Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Meio Ambiente, Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n - Feira de Santana, 44036-900, Novo Horizonte - BA, Brasil.

³ Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba-UNAICC, Calle Humboldt, 104, Esq. Infanta, Vedado, Plaza da Revolución, 10400, Havana, Cuba.

*e-mail: idelfonso@nauta.cu

Resumo: Apresentamos um estudo das fossas paleossísmicas em Cuba, com foco especial na região da falha do Pinar. Revisamos a história sísmica da região e avaliamos os riscos naturais associados à atividade tectônica. Foi utilizada uma combinação de métodos e recursos, incluindo compilação bibliográfica, o Sistema Básico de Pesquisa Regional, o Modelo Digital de Terreno e o software *Surfer 19*. Os resultados obtidos destacam a importância das fossas paleossísmicas como ferramenta fundamental para a compreensão dos processos tectônicos e da atividade sísmica em Cuba. A colaboração internacional tem sido essencial na obtenção de novas informações e na melhoria das estimativas de risco sísmico. São identificadas as limitações e desafios associados à execução de trincheiras paleossísmicas, bem como a importância da sua correta localização. Em conclusão, este estudo lança as bases para uma maior compreensão da sismicidade em Cuba e para o desenvolvimento de estratégias eficazes para a prevenção e mitigação dos riscos sísmicos, contribuindo para o avanço da geociência a nível global.

Palavras-Chaves: paleoseismologia; geociências; atividade sísmica

Abstract: This article presents the study on paleoseismic trenches in Cuba, focusing especially on the Pinar fault region. The main objective is to advance the understanding of the seismic history of the region and evaluate the natural risks associated with tectonic activity. A combination of methods and resources has been used, including bibliographic compilation, the Basic Regional Research System, the Digital Terrain Model and the "Surfer 19" software. The results obtained highlight the importance of paleoseismic trenches as a key tool to understand tectonic processes and seismic activity in Cuba. International collaboration has been essential in obtaining new information and improving seismic risk estimates. The limitations and challenges associated with the execution of paleoseismic trenches are identified, as well as the importance of their proper location. In conclusion, this study lays the foundations for a greater understanding of seismicity in Cuba and the development of effective strategies for the prevention and mitigation of seismic risks, contributing to the advancement of geoscience at a global level.

Keywords: paleoseismology; geoscience; seismic activity

1. Introdução

Uma das áreas da Geofísica menos conhecida na atualidade é a Paleoseismologia, a qual se encarrega de estudar os terremotos pré-históricos, especialmente sua localização, tempo e tamanho. Enquanto os sismólogos trabalham com dados registrados por instrumentos durante terremotos, os paleoseismólogos interpretam as evidências geológicas criadas durante paleoterremotos individuais. A Paleoseismologia se diferencia dos estudos geológicos mais gerais de movimentos crustais lentos a rápidos durante o final do período Cenozoico* (por exemplo, neotectônica) em seu foco na deformação quase instantânea de formas de relevo e sedimentos durante terremotos. Essas longas histórias paleossísmicas, por sua vez, ajudam-nos a compreender muitos aspectos da neotectônica, tais como padrões regionais de sismicidade e deformação tectônica, bem como o comportamento sismogênico de falhas específicas. A Paleoseismologia também faz parte do campo mais amplo da geologia sísmica, que inclui aspectos de estudos instrumentais modernos de terremotos (sismologia), tectônica e geologia estrutural, deformação histórica da superfície (geodésia) e a geomorfologia de paisagens tectônicas (geomorfologia tectônica). Livros de Yeats et al.

Recebido: 10/11/2023

Aceito: 21/03/2024

Publicado: 17/04/2024



Copyright: © 2024 Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(1997), Burbank e Anderson (2001) e Keller e Pinter (2002) apresentam diferentes perspectivas sobre o campo da Paleoseismologia.

Nas últimas décadas, diversas investigações foram realizadas focadas no estudo da falha localizada na província de Pinar do Rio em Cuba, apoiando a possibilidade de aplicação de métodos comuns para analisar a sismicidade em elementos tectônicos ativos em diferentes partes do mundo. No entanto, foi somente em 2010 que o geofísico Zapata-Balanqué, Zapata et al. (2010), levantaram a necessidade de realizar trabalhos de trincheiras paleossísmicas no território do oeste de Cuba. Apesar dos desafios econômicos, que têm sido a principal causa do seu adiamento, em 2023 o CENAIIS (Centro Nacional de Investigación Sismológica) conseguiu iniciar a execução destas trincheiras através de um projeto internacional.

Estes esforços baseiam-se em precedentes significativos no campo da Paleoseismologia. Primeiramente foi desenvolvida a Metodologia para estudos de paleoseismicidade em falhas ativas em Cuba, juntamente com uma proposta de estrutura para o estudo de caso, apresentada por Alcaide et al. (2018) (2). Posteriormente, outras metodologias foram exploradas, como o Estudo de evidências geológico-geomorfológicas de paleoseismicidade na falha de Pinar, Cuba, realizado por Díaz e Arango (2022). Além disso, os trabalhos de Cueva et al. (2015), também contribuíram para certificar a necessidade de investigação com trincheiras paleossísmicas no setor selecionado de San Cristóbal.

Este artigo apresenta conceitos-chave da alfabetização nacional em uma tarefa que se tornará uma referência para as geociências em Cuba. A ausência de antecedentes semelhantes em todo o território cubano destaca a importância desta nova experiência no estudo das fossas paleossísmicas, que promete lançar luz sobre a história sísmica da região e fornecer dados valiosos para a gestão dos riscos naturais. As trincheiras paleossísmicas tornam-se assim uma ferramenta fundamental para a compreensão dos processos tectônicos e da atividade sísmica em Cuba, abrindo caminho para a prevenção e mitigação de futuros eventos sísmicos. As implicações deste trabalho transcendem as fronteiras nacionais e contribuem para o conhecimento global sobre a dinâmica da Terra e o seu impacto na sociedade.

2. Princípios Físicos do Radar de Penetração em Solo

As ondas eletromagnéticas (EM) são um conceito muito importante para entender os métodos que estudam as características geológicas da terra. As ondas EM são oscilações formadas por campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo, e podem propagar-se tanto no vácuo quanto em meios materiais, além disto também são ondas transversais que transportam energia elétrica e magnética à velocidade da luz.

O Radar de Penetração em Solo, ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) também conhecido como Georadar, é uma técnica de inspeção geofísica de superfície que utiliza a reflexão das ondas eletromagnéticas de alta frequência, para obter mapas das estruturas e características geológicas rasas da sub superfície ou localizar objetos enterrados.

Na Figura 1 mostramos um diagrama esquemático do princípio físico do método GPR, o qual consiste na emissão de ondas EM pulsadas de alta frequência (normalmente de 10 MHz a 1.000 MHz) geradas por antenas transmissoras que se propagam para baixo no solo, parte da energia das ondas é refletida ou espalhada de volta à superfície, enquanto parte da energia continua a viajar para baixo. As amplitudes da energia refletida e o tempo de chegada das ondas refletidas de volta por objetos ou estruturas geológicas com propriedades eletromagnéticas diferentes, são medidas em função do tempo de percurso, ou tempo duplo, pelas antenas receptoras. Logos são condicionadas e armazenadas

digitalmente para posterior pós-processamento. Estes sinais refletidos são usados para produzir uma varredura ou rastreamento de dados de radar. Normalmente, as varreduras obtidas à medida que as antenas são movidas sobre a superfície do solo são colocadas lado a lado para produzir um perfil de reflexão de radar, que também são conhecidos como radargramas Benson et al., (1984).

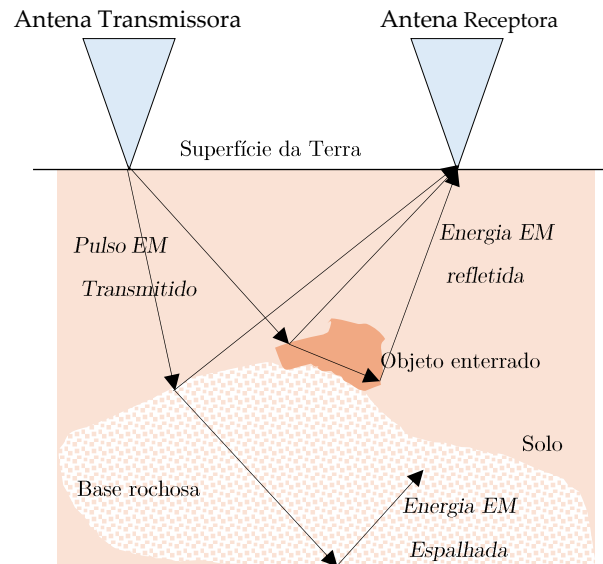


Figura 1. Esquemático do princípio físico do radar de penetração em solo. Um pulso eletromagnético é emitido por uma antena transmissora. Quando a onda encontra uma camada ou objeto com propriedades elétricas diferentes, parte da energia é refletida de volta para a superfície onde uma antena receptora registra o sinal.

As ondas eletromagnéticas viajam a uma velocidade determinada principalmente pela permissividade elétrica do material. A velocidade da onda eletromagnética é diferente entre materiais com permissividades elétricas diferentes, e um sinal que passa através de dois materiais com permissividades diferentes na mesma distância chegará em momentos diferentes. O tempo que a onda leva para viajar da antena transmissora até a antena receptora é chamado de tempo de trânsito (medido em nanossegundos $ns = 10^{-9}$ s) e é proporcional à profundidade do objeto ou alvo enterrado, ou camada geológica. Como a velocidade de uma onda eletromagnética no ar é de 0.3 m/ns, o tempo de viagem de uma onda eletromagnética no ar é de aproximadamente 3.3 ns/m percorrido. A velocidade da onda eletromagnética V_m em um meio não magnético é proporcional ao inverso da raiz quadrada da permissividade do material (Everett, 2013).

$$V_m = c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

onde, V_m é a velocidade da luz no interior do material (m/ns), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), e ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa do material, ou constante dielétrica.

Como a permissividade (ϵ_r) dos materiais terrestres é sempre maior que a permissividade do ar, o tempo de viagem de uma onda em um material que não seja o ar é sempre maior que $3,3$ ns/m. A profundidade (δ) do objeto ou camada alvo pode ser calculada usando esta velocidade pela equação Benson et al., (1984), isto é,

$$\delta = cT/2\sqrt{\epsilon_r} = V_m T/2 \quad (2)$$

aqui T é o tempo de viagem bidirecional em ns.

3. Métodos e Materiais

No desenvolvimento deste trabalho, utilizamos a compilação bibliográfica através do processamento de informações existentes e acumuladas utilizando uma combinação de métodos e recursos para abordar o estudo das trincheiras paleossísmicas em Cuba. Foi realizada uma revisão bibliográfica relacionadas à sismologia, geologia e Paleoseismologia. Esta recolha permitiu-nos aceder aos dados existentes acumulados ao longo do tempo. Seguindo a metodologia proposta por Astraín et al. (1991), foi escolhido o *Sistema Básico de Pesquisa Regional* para estruturar e organizar nossa pesquisa. Este sistema nos forneceu uma estrutura sólida para abordar os aspectos regionais e locais do nosso estudo. Foi utilizado o Modelo Digital de Terreno (MDT), que representa a superfície topográfica, ou seja, o terreno na escala de 1:25.000 fornecido pelo GER-UCM. Este modelo permitiu visualizar e analisar a topografia e morfologia do terreno na área de estudo. Finalmente, foi usado o software *Surfer 19* para gerar mapas e visualizar dados geoespaciais. Este programa nos ajudou a representar graficamente informações relevantes e a realizar análises espaciais.

3. Resultados e Discussões

Os primeiros estudos paleoseismológicos no mundo datam da década de 1970, nos Estados Unidos da América. No caso específico de Cuba, têm sido realizados de forma isolada por diferentes especialistas nas últimas décadas, sendo os antecedentes mais relevantes os trabalhos de Molerio-León (2018), Zapata et al. (2010), Cueva et al. (2015), Alcaide et al. (2018) e Díaz e Arango (2022). No entanto, até à data não foi realizada nenhuma escavação paleossísmicas por razões logísticas que impediram a sua conclusão, apesar de estar planeada há mais de uma década.

A possibilidade de realizar este tipo de trabalho científico em Cuba dependerá da vontade e colaboração de instituições e organismos da administração central, bem como da colaboração internacional de países como a União Europeia e a Venezuela, que possam fornecer os recursos necessários. e meios para sua execução (Álvarez et al., 1991).

A colaboração internacional desempenha um papel crucial na obtenção de novas informações para melhorar as estimativas do risco sísmico em Cuba. Entre as estratégias propostas estão:

- a) Obter novas estações e densificar a rede nacional de estações sismológicas para melhorar a precisão na localização de focos sísmicos e aumentar o número de eventos registados, o que contribuiria para uma melhor delimitação das zonas geradoras de sismo (Álvarez et al., 1991; Cotilla et al., 1994). Com isso seríamos capazes de aproximar cada estação em distância física e reduzir erros ao obter coordenadas focais mais reais ou exatas. O número de terremotos registados por área também aumentaria e, assim, a precisão das zonas geradoras de terremotos aumentaria.
- b) Realizar estudos paleosísmicos em diferentes escalas para identificar vestígios de terremotos passados, o que é essencial para compreender a sismicidade regional e local, determinar a magnitude dos eventos passados, o setor de falhas afetado e o tempo aproximado de ocorrência (Álvarez et al., 1991; Cotilla e outros, 1994).

A análises abrangente das informações obtidas em estudos como o realizado sobre a falha do Pinar permite-nos resolver problemas importantes, como determinar a segmentação das zonas de falha e estimar a frequência de ocorrência de fortes sismos em cada segmento. Contudo, aspectos como a frequência de ocorrência ainda requerem mais pesquisas e análises (Cotilla et al., 1994).

No contexto de Cuba, a aplicação destes estudos nas áreas com categoria sísmica mais elevada (Máx. > 6,5) deverá contribuir significativamente para a compreensão do potencial sísmico nestas áreas, aspecto que foi parcialmente abordado em estudos anteriores. (Cotilla et al., 1994).

3.1 Trincheiras

São fossas, valas ou escavações alongadas atualmente realizadas geralmente com recurso a meios mecânicos convencionais (escavadoras), que permitem a observação direta do terreno a uma determinada profundidade, bem como a recolha de amostras e a realização de ensaios no local. A vantagem da sua utilização é que permitem o acesso direto ao terreno em profundidade, permitindo observar variações litológicas e estruturais (litologia, descontinuidades e contatos), bem como permitir a recolha de amostras de diferentes tamanhos e graus de conservação para ensaio. e análises em diferentes profundidades in loco ou para laboratório, a realização de fotografias e vídeos é outra das vantagens que as valas proporcionam além da possibilidade de colocação de dispositivos de medição temporários e permanentes para medições dos campos físicos de solos e rochas.

As trincheiras paleossismológicas são métodos utilizados no reconhecimento de zonas de falhas ativas ou faixas geradoras de terremotos, e dados os seus custos de execução (elevados), constituem um elemento incomum em qualquer tipo de pesquisa de campo, por isso quando são realizadas são utilizadas e todas dele são extraídas informações possíveis em diversas áreas do conhecimento. Eles permitem descrições detalhadas de litologia (tipos de solo e rocha), tectônica (falhas, juntas), realização de cortes e croquis geológicos e de engenharia-geológica, bem como testes de propriedades físico-mecânicas in situ dos medidores. Os pontos e níveis de afluência das águas subterrâneas podem ser determinados para determinar a sua composição e propriedades. Eles têm as seguintes limitações:

- O local deverá ter acessibilidade aos equipamentos a serem utilizados.
- A localização deve ser perpendicular ou diagonal à estrutura a ser investigada.
- O terreno deve estar desprovido de instalações eléctricas, hidráulicas ou outras que obstruam ou ponham em perigo a vida de quem trabalha na execução da escavação.
- Seu comprimento não deve ultrapassar 50-70m. Eles podem ser contínuos ou segmentados
- A profundidade não deve ultrapassar 4m.
- Sua largura deve estar entre 1,5-3m
- A presença de água atmosférica e subterrânea limita a sua execução e investigação.
- A dureza do terreno deve permitir a escavação com meios mecânicos.
- Para a sua execução é imprescindível o cumprimento das normas de segurança contra desmoronamentos de paredes e entrada de águas superficiais, atmosféricas e subterrâneas.
- Devem ser colocados padrões nas paredes e pisos que permitam georreferenciar as atividades realizadas, bem como as amostras colhidas.

Os resultados deste tipo de levantamento são registrados em etapas nas quais são indicadas a profundidade, continuidade dos diferentes níveis, descrição litológica, descontinuidades, presença de vazamentos, localização das amostras retiradas e fotografias.

Para planejar um programa de medição é necessário escolher as grandezas a serem medidas e o tipo de instrumentos a serem utilizados. Onde para eles devemos estabelecer uma rede especial de estações geodésicas de pontos de centralização forçada de monitoramento com receptores GNSS, o que nos permite determinar a geodinâmica em toda a área para poder localizar os locais com maior velocidade e direção de movimento onde permite para localizarmos as superfícies de ruptura. As medidas a obter podem ser:

- Movimentos superficiais.

- Movimentos dentro do terreno. Eles são medidos com inclinômetros e extensômetros. Além de serem úteis para medir a velocidade e direção do movimento, esses sistemas permitem localizar as superfícies de ruptura.
- Movimentos para abertura de fissuras e entre diferentes pontos. É medido diretamente com instrumentos como fitas metálicas calibradas ou paquímetros e outros instrumentos digitais.
- Pressões intersticiais e suas variações. São realizadas através da instalação de um piezômetro em furos de sondagem ou poços nas paredes e no piso da escavação.
- Pressão do solo sobre elementos de construção.

Para alcançar estes elementos, é necessário ter realizado testes prévios nos diferentes materiais que aparecem no corte durante o processo de investigação geológica de engenharia detalhada nas amostras de perfuração rotativa, porém, outros materiais aparecerão no processo de escavação que são amostras serão tomadas amostras para compreender suas propriedades e alcançar a estabilidade das paredes da vala ou as amostras serão analisadas sob outras condições de conservação.

Outros métodos geomáticos devem ser planejados em combinação, monitoramento de levantamentos com VANTs e varredura com *Scanner Laser* com o objetivo de poder obter imagens em tempo real do monitoramento do interior e exterior da vala para atingir o mais alto nível de precisão e exatidão. localização georreferenciada com ponto fora do ambiente construtivo de todos os elementos descritos dentro e fora.

Devem ser realizados ensaios laboratoriais para classificar os tipos litológicos e determinar as propriedades das rochas e solos, constituindo um dos aspectos mais importantes da pesquisa, datando-os com métodos conhecidos como (C 14 convencional ou por Espectrometria de Massa com Acelerômetro ou). AMS-, termoluminescência ou TL-), ou mais raramente por: luminescência óptica estimulada –ou OSL- isótopos cosmogênicos –Be10, Al 26, He3 -, racemização de aminoácidos e séries de Urânio (U/Th), e compará-los.

O tipo e o número de testes a realizar dependem, principalmente, do objetivo que perseguimos com as investigações e com o projeto; O tamanho, o número e o local de origem das amostras a testar dependem também do problema geológico ou de engenharia-geológico a resolver e das condições econômicas e estatísticas em que nos encontramos.

Tipos de ensaios

Identificação do tipo de solo ou rocha

Propriedades geotécnicas, espessura, densidade, velocidade da onda transversal, módulo de rigidez, resistência, CPT, profundidade do lençol freático, determinando sua granulometria e plasticidade, aos quais se soma o teor de SO₃, CO₂, teor de matéria orgânica, resistência, para este último eles são classificados em:

- 1) Testes de penetração padrão (SPT)
- 2) Testes de penetração dinâmica
- 3) Testes de penetração estática
- 4) Testes de palhetas
- 5) Esclerômetro ou martelo Schmidt
- 6) Testes de carga pontual.

Os testes laboratoriais incluirão datação e paleontologia. Os métodos de datação dependem do tipo de material coletado, utilizando técnicas modernas para esse fim. A taxa média de deslocamento é obtida a partir dos deslocamentos dos horizontes datados. A avaliação da magnitude dos paleoterremotos é realizada através de relações empíricas entre magnitude e salto ou deslocamento em escarpas de falhas e a partir do aparecimento de

diferentes padrões ou indícios no terreno. Permitindo avaliar o período de recorrência da taxa de deslocamento calculada acima.

3.2 Por que fazer uma trincheira paleoseismogeológica?

São construídos porque é a forma mais precisa de obter informação sobre Paleoseismologia ou geologia sísmica, capaz de fornecer informação sobre o passado pré-histórico das estruturas sismogênicas, para a avaliação de grandes sismos do passado, desconhecidos pela sismicidade instrumental e histórica. A Paleoseismologia busca avaliar o potencial sísmico das falhas geológicas estabelecendo os parâmetros sísmicos dos terremotos detectados no registro geológico.

Por outro lado, o objetivo da análise de falhas paleossísmicas é determinar a velocidade média com que as falhas se movem, avaliar a magnitude dos terremotos paleossísmicos e estabelecer a datação do último evento paleossísmico. A determinação da taxa de escorregamento é obtida através de estudos das falhas nas valas escavadas para esse fim, normalmente perpendiculares à falha ativa. São analisados os níveis sedimentares ou pedológicos das escarpas do terreno.

3.3 Por que a falha de Pinar?

Apesar da falha do Pinar ser uma estrutura intraplaca evidente, com dois blocos muito bem definidos e geomorfologicamente visíveis no seu maior segmento, com um conjunto de investigações realizadas nas últimas décadas. Não existe conhecimento real ou estimado de um dos elementos mais importantes na realização de uma análise de risco sísmico (recorrência na sua atividade). A busca pelos estágios históricos de grandes terremotos ocorridos no passado, para estimar o perigo, a magnitude e assim prever a frequência de eventos futuros.

A falha do Pinar constitui a feição morfoestrutural e geodinâmica mais relevante da área emersa do arquipélago cubano, considerada uma falha de primeira ordem, transcortical, subvertical, com deslocamento horizontal à esquerda com componente normal, com tendência sudoeste-nordeste, mergulhando para ao sul, com ângulos de 70 a 80 graus, sua extensão mapeada em mapas especializados é de cerca de 160 km e aproximadamente três quilômetros de deslocamento vertical Pszczolkowski et al., (1987). Existem estudos mais recentes e não totalmente validados que propõem uma extensão para Leste que afeta territórios das províncias de Artemisa, Havana e Mayabeque.

3.3 Onde fazer uma trincheira Paleossísmica?

A correta localização da escavação garantirá o sucesso da busca por elementos paleossísmicos que ajudem a determinar os dados necessários. Portanto, deve ser realizado em uma área ativa do ponto de vista sísmológico e com passado ativo, onde o registro sedimentar seja o mais completo possível, haja preservação no teto e no piso da falha do mesmo horizonte estratigráfico (Isto permite calcular o deslocamento acumulado em diferentes estratos e individualizar horizontes de eventos). A existência de horizontes guias e materiais adequados à datação, e que o local não tenha tido intervenção antrópica, onde foi previamente realizado um estudo geológico-geomorfológico detalhado e estudos geofísicos do subsolo.

É importante, antes de fazer instalações temporárias no meio ambiente, conhecer o uso e a propriedade do terreno. O tipo de propriedade estatal, cooperativa ou privada, se pertence a um parque nacional ou a uma reserva ecológica, estes elementos determinarão se o local selecionado pode ser investigado e a quem deverão ser solicitadas as licenças correspondentes. Este elemento pode influenciar o tamanho da escavação, o método de escavação a ser utilizado, e como será a restauração final, a construção de condições

provisórias, garantia de água ou outros materiais. Caso o imóvel seja estatal, as licenças serão solicitadas e processadas junto ao ministério a que pertence o terreno. Da mesma forma, se o imóvel for privado ou cooperativo, os procedimentos pertinentes serão realizados de acordo com o. lei, o que pode levar à entrega de indenização de acordo com as condições do proprietário e a situação do terreno. Nos casos de Parques Nacionais, reservas de diferentes categorias, poderá implicar compromissos obrigatórios como: escavar manualmente; escavar uma pequena vala (10 m de comprimento, 2 m de largura e 2 m de profundidade); remova e recoloca cuidadosamente a cobertura vegetal original; e obter licenças de autorização estendidas, mesmo usando canais governamentais que agilizam as autorizações.

A acessibilidade ao local de escavação deverá ser feita através de estradas já construídas e caso não existam, conseguir a menor movimentação de terra possível, implicará na decisão sobre que tipo de equipamento poderá realizar a obra. A total ausência de possibilidades de chegar ao local por via rodoviária levará à avaliação da possibilidade de execução manual da obra ou à avaliação de transferência definitiva de cargo. Isso traria outros tipos de análises que alterariam os horários e possivelmente aumentariam os custos de hospedagem, alimentação, outros insumos e ferramentas, juntamente com as possibilidades de contratação de mão de obra local.

Topografia do local da escavação. A irregularidade topográfica também influenciará a seleção final do equipamento de escavação; uma escavação através de uma escarpa de grande desnível topográfico impossibilitaria equipamentos autopropelidos sobre rodas, como é o caso de San Cristóbal, e onde é necessária a substituição da topografia original devido à sua condição de ser La Sierra del Rosario Reserva da Biosfera. Não pode ser escavado apenas com escavadeira, pois é necessário deixar material retirado na parte superior da escavação para posterior entupimento; mas o comprimento do braço também precisa ser levado em consideração para atingir as profundidades de projeto. Sua manobrabilidade deve ser elevada para atingir o que é projetado. As experiências coletadas indicam que os tratores podem atingir valas de até 8m de profundidade dependendo do material.

Deve-se ter em conta a existência de níveis freáticos próximos da superfície ou dos níveis de chegada para garantir a drenagem com bombas de extração e condicionar o piso para permitir uma extração rápida e fácil. enfrentar os períodos chuvosos que afetam as águas superficiais e subterrâneas. As valas devem ser mantidas afastadas de correntes permanentes ou intermitentes, se possível, e a circulação da água natural deve ser estudada para não interromper o seu curso com a extração de sedimentos, conseguindo canalização protetora e evacuação de todos os tipos e fontes de água.

Os aspectos geológicos também são essenciais na seleção da localização da trincheira, independente da macrolocalização que foi realizada a partir dos estudos regionais e dos mapas de pequena escala, é necessário realizar uma microlocalização a partir de estudos mais detalhados onde ela está localizada. com precisão de 1:1000 o traço da falha que se tentará alcançar perpendicularmente. Serão localizados no local sedimentos jovens e moles com o objetivo de determinar deformações nos mesmos (piso e cobertura) em cada um dos blocos. Os ciclos de erosão devem ser estudados para não encontrar pacotes erodidos ou blocos com excesso de sedimentos. Os materiais devem ser datáveis por um dos métodos explicados anteriormente.

As trincheiras geológicas sísmicas devem ser localizadas de modo que cortem essas estruturas perpendicularmente ou pelo menos as cruzem diagonalmente. Como afirmado anteriormente, foram realizadas pesquisas de diferentes tipos e autores onde algumas das

características físicas foram esclarecidas e onde, com estudos regionais básicos, foi alcançada uma microzona que permitirá abordar com maior detalhe os métodos específicos de pesquisa. Para tanto, neste caso, foram trabalhadas quatro áreas na escala de 1:25.000, ver Figura 1(a), que mostraram a área de San Cristóbal (a mais a leste) em Artemisa como a mais adequada para o transporte realizar este tipo de construção e qual proporcionará maiores resultados, ver Figura 1(b). Já dentro desta área, a investigação geofísica, o levantamento detalhado 1:1000 e a perfuração darão o local específico onde será feita a vala.

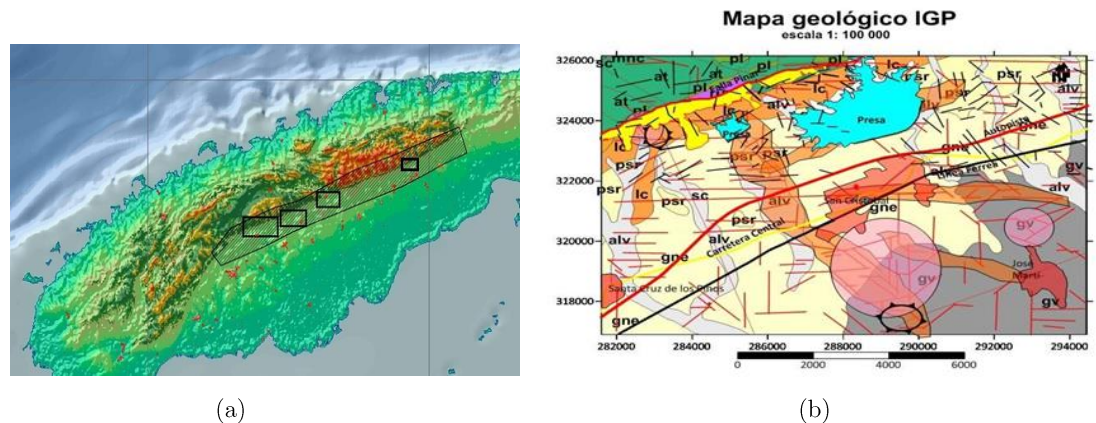


Figure 1. (a) Mapa dos Setores investigados do ponto de vista geomorfológico, áreas selecionadas para a realização dos estudos e construção das trincheiras geológicas sísmicas. (b) Mapa geológico 1:100.000 de San Cristóbal interpretado para a localização das Trincheiras SISMO GEOLOGICAS (Díaz, I. 2021).

Nas aberturas das trincheiras deverá haver exposição detalhada dos diferentes níveis estratigráficos presentes e das estruturas de deformação identificadas e determinação da sua origem tectónica ou sedimentar, quantificação dos deslocamentos levantados, identificação de horizontes de eventos e datação dos materiais afetados. deformação ou ruptura. Deve-se levar em consideração que a magnitude das deformações depende da energia liberada, da profundidade hipocentral, da duração do tremor, do caráter da falha e dos materiais afetados (McCalpin 1996). Para localizar o local onde serão implantadas as trincheiras, dois fatores fundamentais devem ser analisados: fatores geológicos e fatores geográficos.

Estabelecer a localização precisa do traço ativo da falha em estudo é uma necessidade imperiosa, para a qual deve ser utilizado o arsenal de métodos geofísicos, dentro dos quais o Georadar cumpre importantes funções de localização de estruturas.

Para interpretar estes radargramas são utilizados programas de computação dos equipamentos, que geralmente apresentam diferentes filtros que facilitam a visualização dos sinais e suas correlações com as diferentes litologias e estruturas. A elaboração de uma trincheira paleoseismogeológica pode resolver:

- O potencial sismogenético (a repetição de prováveis terremotos máximos).
- Segmentação (sismogenética) da falha.
- A interação de falhas vizinhas ou segmentos de falhas contíguas.
- A distribuição espaço-temporal da atividade sísmica ao longo da falha.
- A associação sismotectônica de terremotos históricos.
- A ocorrência do último evento não registrado.
- A probabilidade de ocorrência do próximo evento.
- Refinar ou refinar: a taxa média de deslocamento da falha.
- Deslocamento cosísmico por evento.

- A proporção dos componentes verticais e horizontais do movimento
- A cinemática da falha através da observação direta da estria.

Dos parágrafos anteriores pode-se obter a resposta sobre porque é necessário o estudo com trincheiras paleossísmicas na falha do Pinar e é justamente que não foi possível em investigações anteriores, nem pela análise de dados históricos, nem por dados instrumentais de últimos quase 60 anos para obter os períodos de recorrência dos eventos de grande magnitude que ocorreram nesta região relacionados à falha. Tendo a possibilidade de construir estas trincheiras, talvez estes objetivos possam ser alcançados, o que poderá nos aproximar de uma previsão de movimento mais precisa.

5. Conclusões

O estudo das fossas paleossísmicas em Cuba, especialmente na região da falha do Pinar, representa um marco significativo na geociência do país. Apresentamos uma revisão da história sísmica da região e na avaliação dos riscos naturais associados à atividade tectônica. A utilização do Sistema Básico de Pesquisa Regional, do Modelo Digital de Terreno e do software Surfer 19 permitiu estruturar a investigação e visualizar de forma eficaz os dados geoespaciais relevantes. Os resultados obtidos e discutidos ao longo deste estudo destacaram a importância das trincheiras paleossísmicas como ferramenta fundamental para a compreensão dos processos tectônicos e da atividade sísmica em Cuba. A colaboração internacional foi fundamental na obtenção de novas informações e na melhoria das estimativas de risco sísmico na região. A identificação das limitações e desafios associados à execução de trincheiras paleossísmicas, bem como a descrição detalhada dos tipos de testes e análises realizados, fornecem um guia claro para futuras investigações nesta área. Além disso, destaca-se a importância da correta localização das trincheiras, considerando aspectos geológicos e geográficos, para maximizar a eficácia dos resultados obtidos. Em resumo, este estudo estabelece as bases para uma maior compreensão da sismicidade em Cuba e para o desenvolvimento de estratégias eficazes para a prevenção e mitigação dos riscos sísmicos. As trincheiras paleossísmicas surgem como uma ferramenta indispensável para o avanço do conhecimento da dinâmica da Terra e seu impacto na sociedade, contribuindo assim para o avanço da geociência em Cuba.

Referências

- Yeats, R. S., Sieh, K. E., and Allen, C. A. (1997). *The Geology of Earthquakes*, 576 p. Oxford University Press, New York.
- Burbank, D. W., and Anderson, R. S. (2001). *Tectonic Geomorphology*, 274 p. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Keller, E. A., and Pinter, N. (2001). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*, 2nd edn., 362 p. Prentice-Hall, New York.
- Zapata, et al. (2010). Trincheras paleossísmicas en Cuba: Una propuesta necesaria. *Boletín de Geociencias*, 25(1), 35-47.
- Alcaide, J., et al. (2018). Metodología para estudios paleosísmicos en fallas activas de Cuba. *Investigaciones Geo científicas*, 42(2), 87-102.
- Díaz, E., & Arango, M. (2022). Estudio de evidencias geólogo-geomorfológicas de la paleoseismicidad en la Falla Pinar, Cuba. *Revista de Geociencias Avanzadas*, 15(1), 55-68.
- Cueva, A., et al. (2015). Análisis geomorfológico de la actividad sísmica en la Falla Pinar, Cuba. *Revista de Geología Aplicada*, 30(4), 210-225.
- Benson, R., et al., (1984). *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*. EPA-600/7-84-064. 256 pp. June.
- Everett, M., 2013. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 441 pp. April.
- Molerio-León, L.F., Balado-Piedra, E.J. y Núñez Haugh, L., 2018. Cronoestratigrafía relativa de eventos paleosísmicos en el tercio inferior del río Jaruco, Cuba Occidental. *Gota a gota*, nº 15: 93-96. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.).
- Álvarez, A., et al. (1991). Estudios de sismotectónica en Cuba: Necesidades y perspectivas. *Revista Cubana de Geociencias*, 16(2), 45-58.
- Cotilla, M., Franzke, H. J. (1994): Some Comments on the Seismotectonic Activity of Cuba. *Z. Geol. Wiss.*, 22: 347-352. Berlín.
- Cotilla, R., et al. (1994). Avances en la estimación del riesgo sísmico en Cuba. *Geología y Sismología*, 20(3), 112-125.

Pszczolkowski, A., Piotrowska, K., Myczynski, K., Piotrowski, J., Skupinski, A., Grodzicki, J., Danilewski, D., et al. (1975) Texto explicativo al mapa geológico a escala 1: 250 000 de la provincia de Pinar del Río. En. Pinar del Río: ONRM. 905 pp.

James P. McCalpin (2009). Earthquake Magnitude Scales. International Geophysics, Academic Press, Volume 95, pp:1-3, [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(09\)95015-X](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(09)95015-X)

Isenção de responsabilidade/Nota do editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são exclusivamente de responsabilidade do(s) autor(es) e colaborador(es) individual(is) e não do Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es). O Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es) isentam-se de responsabilidade por qualquer dano a pessoas ou propriedades resultante de quaisquer ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.