



ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE SÍSMICA DO HAITI: COMBINANDO MÉTODOS MULTICRITÉRIO

Djimy Dolcin¹
Sebastián Isaías Jorge Muñoz Vásquez²
Pedro Edson Face Moura³
Mauricio Alejandro Perea Ardila⁴
Antonia Beatriz Ferreira Andrade⁵
Eliomara Leite Meira Gomes⁶
Anna Sabrina Vidal de Souza⁷
Kaio Victor Nunes de Macedo⁸
Rubson Pinheiro Maia⁹

RESUMO

O Haiti, localizado na fronteira entre as placas do Caribe e da América do Norte, apresenta uma alta suscetibilidade sísmica devido à intensa atividade tectônica. Historicamente, grandes terremotos impactaram severamente o país, agravados por fatores geomorfológicos que amplificam os efeitos sísmicos. Este estudo analisa a suscetibilidade sísmica do Haiti a partir de uma abordagem multicritério, considerando fatores como declividade, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica e VS30 (velocidade de propagação das ondas sísmicas). Os resultados indicam que áreas de planícies aluviais não consolidadas apresentam maior risco devido à amplificação sísmica, enquanto regiões de declividade acentuada mostram menor suscetibilidade. O mapeamento da suscetibilidade sísmica revelou que aproximadamente 25% do território haitiano está altamente exposto, concentrando grande parte da população em áreas vulneráveis. Esses achados reforçam a necessidade de políticas de ordenamento territorial, adoção de técnicas de construção resilientes e implementação de estratégias de conscientização para reduzir a vulnerabilidade da população. O estudo destaca a importância da gestão integrada do risco sísmico, combinando conhecimento geotécnico e geomorfológico para subsidiar ações preventivas e políticas públicas. A disseminação de informações sobre a suscetibilidade sísmica do Haiti pode contribuir significativamente para a mitigação de desastres e a segurança da população.

Palavras-chave: Geomorfologia, Risco Sísmico, Susceptibilidade Sísmica, Ordenamento Territorial, Haiti.

INTRODUÇÃO

¹Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, djimy.dolcin@yahoo.fr

² Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, geo.smunozv@gmail.com

³ Doutor pelo Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, pedroedson18@gmail.com

⁴ Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, mauricioaperea@alu.ufc.br

⁵ Graduada pelo Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, beatrizadrade501@gmail.com

⁶ Mestra pelo Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, eliomara1gomes@gmail.com

⁷ Doutoranda do Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, annasabrinavidal@gmail.com

⁸ Graduando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Ceará - CE, nunesmacedo@alu.ufc.br

⁹ Professor orientador: Doutor, Professor do Curso de Geografia da UFC - CE, rubsonpinheiro@yahoo.com.br



O presente estudo tem como objetivo identificar a suscetibilidade sísmica no Haiti, de forma a estabelecermos as áreas mais e menos suscetíveis à ocorrência de terremotos ao nível do impacto no território.

Haiti, a parte ocidental da Ilha de Hispaniola (Corbeau et al., 2017), está localizada na borda norte da placa do Caribe, ao longo da zona de subducção-colisão com a placa da América do Norte (Figura 1) (Gilles et al., 2020). A placa do Caribe está se movendo a uma velocidade de cerca de 20 mm/ano na direção N70°E em relação à placa da América do Norte (Brink et al, 2011; Corbeau et al., 2017), ao longo de uma fronteira orientada leste-oeste (Corbeau et al., 2017). Este limite de placas é transpressivo onde a deformação é absorvida por falhas transformantes e zonas compressivas complexas (Proyecto Sismo-Haiti, 2012).

No contexto de Hispaniola, três grandes sistemas de falhas formam a fronteira entre as duas placas: o sistema de falhas direcionais sinistrais do sul da península do Haiti comumente chamado de EPGFZ (Enriquillo-Plantain Garden) ao sul, o sistema SOFZ (Oriente/Septentrional Fault Zone) e o NHF (North Hispaniola Fault) na parte norte do país, e por último um sistema de compressão composta por diferentes cavalgamentos das cadeias trans-haitianas no centro (Saint-Fleur, 2014), como pode ser visto na figura 1.

Em 12 de janeiro de 2010, um forte terremoto atingiu o Haiti, provocando uma das maiores tragédias dos últimos tempos (Mora-Castro et al., 2012). A destruição de prédios, a perda de vidas e o colapso da infraestrutura marcam profundamente o país (Lacassin et al., 2013). De fato, 15 a 20 terremotos de magnitude superior a 7 afetam a Terra a cada ano, a maioria sem efeitos destrutivos (Lacassin et al., 2013). No entanto, também existem fatores agravantes ligados à própria natureza dos solos e subsolo que amplificam o potencial destrutivo do terremoto em certos locais com concentrações localmente significativas de danos (Bertil et al., 2013).

No Haiti, a proximidade de áreas densamente povoadas e a grande vulnerabilidade das construções, aliadas à amplitude do terremoto, fizeram com que a extensão dos danos fosse sem precedentes (GEO-HAÏTI, 2010). No entanto, até hoje as cidades ameaçadas por terremotos, em muitos casos verdadeiras metrópoles, ainda estão se expandindo de forma descontrolada, existindo evidências claras de que o risco de terremotos deve aumentar (BRGM; CIAT, 2015). É neste contexto particular, onde se chocam duas grandes forças (urbanização e crescimento populacional) é que a prevenção do risco sísmico é necessária ou mesmo vital para a sobrevivência de todos os habitantes. Nesse



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

caso, os modos de apropriação dos espaços devem levar em conta as restrições ambientais para reduzir as consequências negativas.

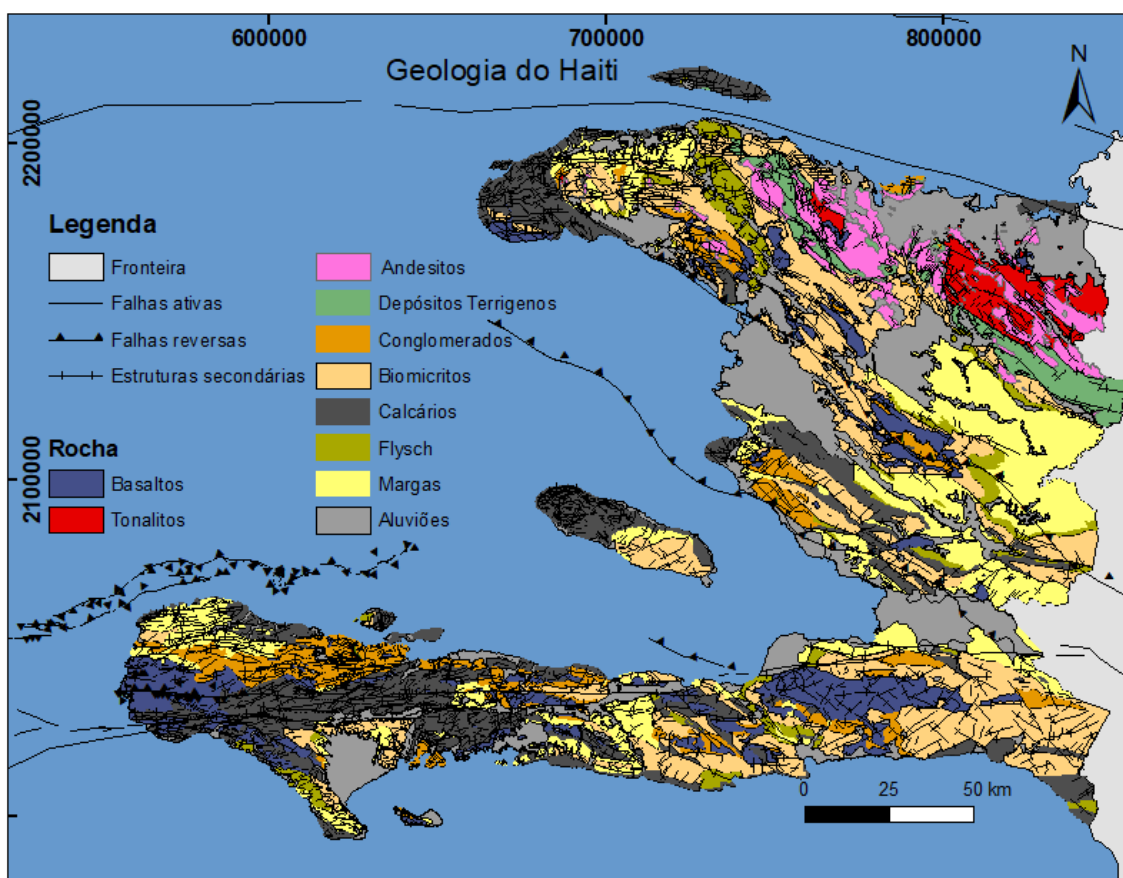


Figura 1. Principais sistemas de falhas em Hispaniola. Fonte: Organizado pelos autores, 2024.

Assim, este artigo busca analisar a suscetibilidade sísmica do Haiti em relação com os fatores geomorfológicos. Pois, a magnitude do terremoto de 12 de janeiro de 2010 embora significativa, não explica por si só a dimensão da catástrofe. As configurações geológicas e topográficas locais foram dois fatores determinantes para a gravidade dos danos. De fato, as condições topográficas (relevo) ou geológicas locais (especialmente solo macio apoiado em rocha mais dura) podem criar efeitos que ampliam a intensidade de um terremoto. Se não houver efeito de sítio, a intensidade de um terremoto é maior no epicentro e diminui com a distância devido à atenuação introduzida pelo meio geológico pelo qual passam as ondas sísmicas (Leone et al., 2010).

METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)



Este presente trabalho é uma pesquisa bibliográfica. Isso tem como objetivo compilar informações secundárias de natureza qualitativa sobre toda a área de estudo em relação com os fatores geomorfológicos e ameaça sísmica. Foram realizados levantamentos cartográficos para a avaliação quantitativa da suscetibilidade sísmica da região do Haiti nas bases de dados do BME (Escritório de Minas e Energia) (2005) e CNIGS (Centro Nacional de Informação Geoespacial) (2015).

O processo do mapeamento da suscetibilidade sísmica começa ajustando todas as camadas ao mesmo formato, extensão e número de pixels, utilizando a camada limite do Haiti como referência, com pixels de 10x10 metros, igual ao DEM inicial. Para o cálculo da declividade, é gerado um modelo de SLOPE e classificado conforme uma tabela. As camadas de litologia, geomorfologia e hidrogeologia são vetorizadas e reclassificadas, gerando rasterizados. Finalmente, a variável VS30 é transformada com base em valores tabelados.

Para realização do mapa de suscetibilidade sísmica, foi realizada a análise multicritérios de cinco fatores geomorfológicos, os quais são: declividade, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica, VS30 (velocidade de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30 metros). Os parâmetros escolhidos foram classificados em cinco (5) classes como mencionadas na tabela 1.

Tabela 1. Indicadores de suscetibilidade sísmica do Haiti.

Fator	Categorias	Níveis Perigosos	Atributo Numérico
Declividade (° ou %)	1 - 8°	Muito baixo	1
	8 - 15°	Baixo	2
	15 - 22°	Médio	3
	22 - 35°	Alto	4
	35 - +°	Muito alto	5
Unidade Geomorfológica	Depósitos costeiros	Muito Alto	5
	Coberturas detríticas	Muito Alto	5
	Lagos	Muito Alto	5
	Maciços residuais	Muito Baixo	1
	Montanhas baixas	Médio	3
VS30 (em m/s)	Planaltos	Médio	3
	-180	Muito alto	5
	180 - 360	Alto	4
	360 - 760	Médio	3
	760 - 1500	Baixo	2
Unidade Hidrogeológica	1500 a +	Muito baixo	1
	Aquíferos Aluviais	Muito Alto	5
	Aquíferos de Carbonatos	Médio	3
	Aquíferos Cársticos	Médio	3
	Aquíferos Cristalinos	Baixo	2



	Aquíferos Sedimentares Indiferenciados	Médio	3
Unidade litológica	Inconsolidadas	Muito alto	5
	Muito consolidadas	Muito Baixo	1
	Consolidadas	Baixo	2
	Semiconsolidadas	Médio	3

Nesse estudo, no contexto da suscetibilidade sísmica no Haiti, todas as variáveis têm o mesmo peso (20%) nos efeitos locais dos terremotos. Então esses fatores facilitaram a elaboração desse mapa a partir dos pesos atribuídos ao grau de cada variável: declividade, Vs30, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica pela seguinte operação:

$$\text{Equação 1. Suscetibilidade sísmica (SS)} = \sum_{i=1}^n Si * Wi$$

Onde: S_i identificados para as categorias dos fatores geomorfológicos e multiplicados pelos seus respectivos pesos W_i .

Essa operação matemática foi realizada em ambiente de SIG através da edição da tabela de atributos dos dados compatibilizados em estrutura vetorial. Esta operação permitiu em valores numéricos que foram classificados em perigo muito baixo (1), baixo (2), médio (3), médio alto (4) e alto (5). A soma de cada pixel fornece uma avaliação da suscetibilidade sísmica a partir da equação 1.

REFERENCIAL TEÓRICO

Por definição, a suscetibilidade indica a propensão de uma área a ser afetada por um determinado perigo, avaliando os fatores que predisõem à ocorrência dos processos ou ações que o caracterizam, embora o período de retorno do perigo analisado não seja calculado (Julião et al., 2009). Nesse sentido, a suscetibilidade é como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a susceptibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal (Corteletti, 2014).

No que diz respeito à suscetibilidade sísmica, esta apresenta a ameaça induzida pela configuração geológica e topográfica local (e.g. efeitos de sítio, deslizamentos de terra, liquefação dos solos). Em outras palavras, o termo se refere a fatores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos locais, tanto da superfície quanto do substrato, que



podem amplificar ou reduzir as vibrações sísmicas ou constituir situações de equilíbrio geomorfológico precário (Panizza, 1991). A suscetibilidade sísmica do Haiti é analisada por meio dos fatores geomorfológicos a partir da classificação sugerida por Panizza (1991), Mora-Castro et al. (2012), Rathje et al. (2011) e Xu (2014). Foram usados alguns fatores predisponentes intrínsecos mais importantes que podem condicionar a suscetibilidade sísmica, sendo eles: ângulo de declividade, unidade geomorfológica, unidade litológica, unidade hidrogeológica, (Tabela 1). Esses fatores possibilitam ver o rompimento da ameaça sísmica regional (Bertil et al., 2013). Em outras palavras, eles tornaram possível levar em conta a influência do solo nos efeitos locais dos terremotos (Mora-Castro et al., 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os fatores geomorfológicos do Haiti são fatores que influenciam na suscetibilidade sísmica. A suscetibilidade sísmica foi classificada em cinco níveis hierárquicos (Figura 2), variando de muito baixa a muito alta.

A Figura abaixo mostra que a suscetibilidade sísmica do Haiti, especificamente, as regiões mais vulneráveis são as planícies onde fatores geomorfológicos são altos. Infelizmente, as cidades com elevada densidade populacional geralmente são encontradas nessas depressões na forma de habitação informal e por vezes anárquica. Portanto, em relação às planícies, devido ao baixo relevo, existe uma espécie de influência dos fatores geológicos na morfologia pouco acentuada.

A classe de muito baixa e baixa suscetibilidade sísmica encontram-se em zonas montanhosas com declives muito acentuados. Por outro lado, as classes de suscetibilidade moderada encontram-se em zonas com declives moderados.

O mapeamento da suscetibilidade sísmica no Haiti permitiu identificar as áreas mais susceptíveis de serem afetadas por sismos, definindo diferentes classes de suscetibilidade. Cerca de 25% da área está exposta à suscetibilidade sísmica, uma vez que esta é a área das planícies aluviais não consolidadas.

No Haiti, no caso de declividade é muito baixo, a suscetibilidade sísmica é muito forte, e quando a declividade é muito forte, a suscetibilidade sísmica muito baixa também. Assim entendemos que as classes de suscetibilidade dependerão dos níveis de litologia e



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

geomorfologia. Portanto, as zonas baixas são depressões preenchidas por aluviões não consolidados.

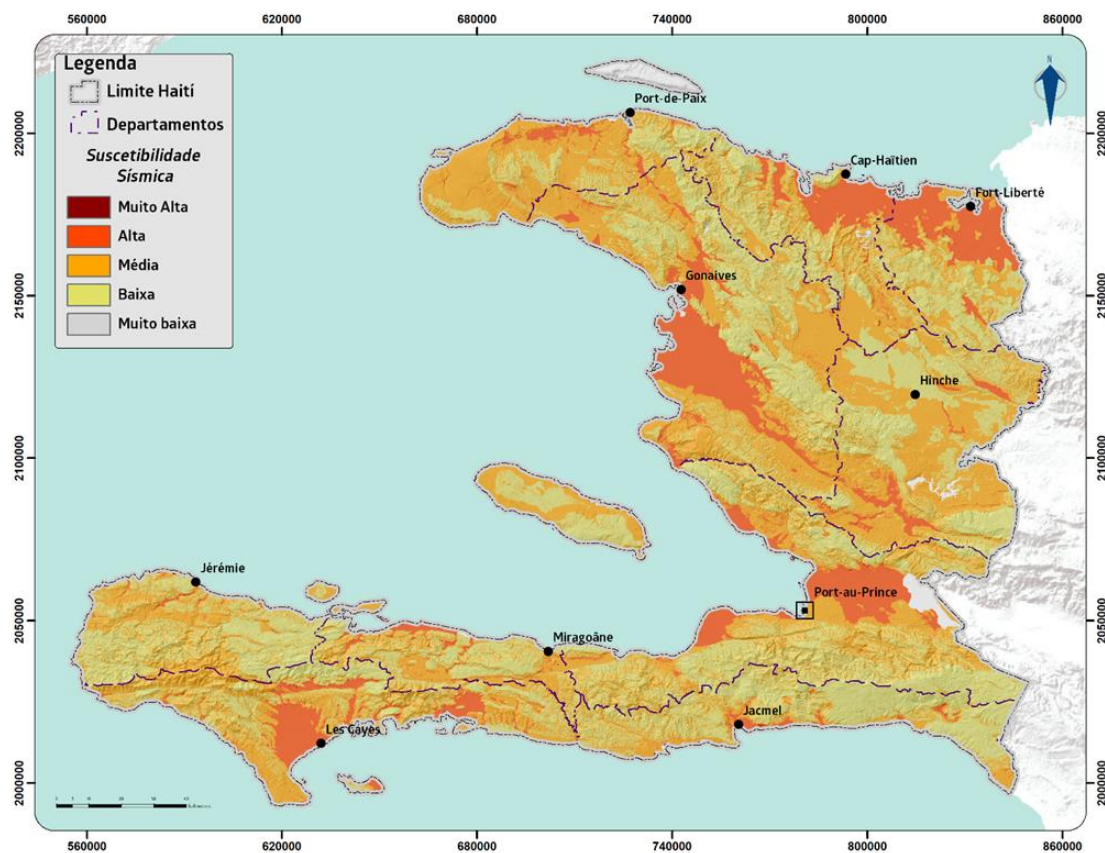


Figura 2. Mapa do Haiti mostrando a suscetibilidade sísmica. Fonte: Organizado pelos autores, 2024.

Durante os terremotos, as ondas sísmicas podem ficar "aprisionadas" no relevo acentuado (efeitos de sítio topográficos) ou dentro dos vales aluviais (efeitos de sítio geológicos), causando uma amplificação ou atenuação do trem de ondas (Leone et al., 2010). Assim, por exemplo, muitas vezes pode-se observar, após um terremoto, maiores danos em edifícios construídos sobre aluviões acumulados em grandes espessuras (planícies aluviais) do que em edifícios sobre solo rochoso (Gilles et al., 2020). Sobre este ponto, certos autores invocaram os efeitos de sítio topográfico e geológico em áreas ao sul da aglomeração de Porto Príncipe durante o terremoto de 12 de janeiro de 2010 (Hough et al., 2010; Assimaki; Jeong, 2013; Gilles et al., 2020). Mas, alguns pesquisadores apenas destacaram a baixa qualidade da maioria das construções (Bilham, 2010). Isso o torna um terremoto mortal.

A ameaça sísmica no Haiti, para além das vibrações transmitidas pelo terreno, gera três ameaças secundárias que devem ser tidas em conta nas decisões de planeamento;



dentre estes, a liquefação de solos soltos merece atenção especial (Mora-Castro, 2010). A liquefação induzida pelo terremoto de 12 de janeiro de 2010 áreas preferencialmente afetadas recentemente aterradas (depois de 1967) da costa de Porto Príncipe. As áreas aterradas mais antigas (anteriores a 1967) também foram afetadas, mas em menor grau (BRGM; CIAT, 2015).

As ondas sísmicas de grandes terremotos também podem induzir fenômenos de movimentos de massa que podem causar danos muito maiores do que aqueles relacionados diretamente às vibrações do solo (Bertil et al., 2013).

Durante o terremoto de 12 de janeiro de 2010, mais de 7000 deslizamentos de terra foram ativados e várias pessoas morreram. Esses deslizamentos se formaram em encostas com declives entre 25°-65° (Mora-Castro et al. 2010).

Analizando a suscetibilidade sísmica do Haiti, fica evidente a necessidade de estratégias de gestão específicas para a situação. Porém, a Figura 2 mostra o mapa de suscetibilidade do Haiti à liquefação e aos movimentos de massa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo trouxe uma análise sobre a suscetibilidade sísmica no Haiti com o objetivo de elucidar os fatores geomorfológicos que condicionam os danos. Nesta análise, os fatores geomorfológicos participam na definição do risco sísmico, pois eles influenciam os efeitos locais dos terremotos. O estudo da suscetibilidade sísmica do Haiti mostra que o nível de vulnerabilidade da população depende de alguns fatores.

Entendemos que o estudo da suscetibilidade sísmica do Haiti permite constatar que a ameaça sísmica é elevada em algumas regiões. Os efeitos esperados variam consoante o sector:

- Planícies costeiras com depósitos aluviais não consolidados
- Preenchimento da linha costeira
- Planícies aluviais com aluviões não compactados
- Zonas de declive acentuado

O resultado desta análise nos impõe a prevenção, articulando-se em torno de dois grandes eixos: informação e educação da população à cultura do risco (comportamento a ser mantido, conhecimento dos padrões de construção relativos aos fenômenos sísmicos) e ordenamento do território.



Por fim, o conhecimento dos territórios é hoje fundamental, porque estão no centro das preocupações centrais da gestão do risco. Gerenciar e prevenir riscos sísmicos requer conhecer os fatores de riscos sísmicos.

Palavras-chave: Geomorfologia, Risco Sísmico, Susceptibilidade Sísmica, Ordenamento Territorial, Haiti.

REFERÊNCIAS

ASSIMAKI, D.; JEONG, S. « Ground-Motion Observations at Hotel Montana during the M 7.0 2010 Haiti Earthquake: Topography or Soil Amplification? ». **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 103, n. 5, p. 2577–2590, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120120242>.

BERTIL D., PRÉPETIT, C.; BELVAUX, M.; NOURY, G. **Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti): rapport de synthèse**. 2013, 69 p. Rapport BRGM/RC-63100-FR

BILHAM, R. Lessons from the Haiti earthquake. **NATURE**, v. 463, n. 7283, p. 878-879, 2010.

BME. **Notice explicative de la carte géologique d’Haïti au 1/250 000ème**. 2005. 44p.

BRGM; CIAT. **Atlas des Menaces Naturelles en Haïti**. 2015. 114p.

BRINK, U. S. T.; BAKUN, W.H.; FLORES, Claudia H. « Historical Perspective on Seismic Hazard to Hispaniola and the Northeast Caribbean Region ». **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. B12318, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JB008497>.

CORBEAU, J.; GONZALEZ, O.L.; CLOUARD, V.; ROLANDONE, F.; LEROY, S.; KEIR, D.; STUART, G.; MOMPLAISIR, R.; BOISSON, D.; PRÉPETIT, C. Is the local seismicity in western Hispaniola (Haiti) capable of imaging northern Caribbean subduction?. **GEOSPHERE**, v. 15, n. 10, p. 1738–1750, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1130/GES02083.1>.

CORTELETTI, R. C. **Proposta de metodologia para análise de riscos geológico - geotécnicos em ferrovias. Estudo de caso: Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. 2014. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014. 202p.

GEO-HAÏTI 2010. **État et Perspectives de l’Environnement**, 2010. 200p.



GILLES, R.; JEAN-PHILIPPE, J.; DORIVAL, V.; GENEÀ, S. **Microzonage sismique du secteur V: rapport des effets de site et liquéfaction**. 2020. 195p.

HOUGH, S. E.; ALTIDOR, J. R.; ANGLADE, D.; GIVEN, D.; JANVIER, M. G.; MAHARREY J. Z.; ZEREMONTE, M.; MILDOR, B. S.-L.; PREPETIT, C.; YONG, A. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M 7.0 Haiti earthquake. **NATURE GEOSCIENCE**, v. 3, p. 778-782, 2010. DOI: 10.1038/NGEO988.

JULIÃO, R. P.; Nery, F.; Ribeiro, J. L.; Castelo Branco, M.; Zêzere, J. L. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica de base municipal**. 2009. 94p.

LACASSIN, Robin et al. **Sismotectonique du tremblement de terre du 12 janvier 2010 en Haïti**. Outre-Terre, v. 1, n° 35-36, p. 163-183, 2013. DOI : 10.3917/oute.035.0163.

LEONE, F; DE RICHEMOND, N. M.; VINET F. Aléas naturels et gestion des risques. 1ère édition. **Paris: Presse universitaire de France**, 2010. 284p.

MORA-CASTRO, S.; ASTÉ, J-P.; COTERA, J.; HAASE, J.; JOSEPH, V.; MARCELLO, M.; MILCÉ, J-E.; ROUMAGNAC, A.; SABORÍO, J.; ZAHIBO, N.; BILLAND, C.; SOLÍS, H.; SIERAKOWSKI, C. **Analyse des menaces naturelles multiples (multimenhas-2) en Haïti étape 2: reconstruction des quartiers**. 2010. 78p. Volume I: Étude régionale sur les menaces naturelles en Haïti.

MORA-CASTRO, S.; SABORÍO, J.; ASTÉ, J.P. PREPETIT, C.; JOSEPH, V.; MATERA, M. Slope instability hazard in Haiti: Emergency assessment for a safe reconstruction. **Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through**, p. 153-172, 2012.

PANIZZA, M. Geomorphology and seismic risk. **Earth-Science Reviews**, 31, p. 11-20, 1991.

PROYECTO SISMO-HAITI. **Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Haití y aplicación al diseño sismorresistente**. 2012. 108p.

RATHJE, E. M.; Bachhuber, J.; Dulberg, R.; Cox, B. R.; Kottke, A.; Wood, C.; Green, R. A.; Olson, S.; Wells, D.; Rix, G. Damage Patterns in Port-au-Prince during the 2010 Haiti Earthquake, **Earthquake Spectra**, v. 27, n. S1, p. S117–S136, 2011.

SAINT-FLEUR, N. **Sismotectonique du système de failles d'Enriquillo et du séisme du 12 janvier 2010 (Mw 7.0) en Haïti**. 2014. Thèse (Doctorat en Géophysique) - Ecole doctorale des Sciences de la Terre, L'Institut de Physique du Globe de Paris, Paris. 2014, 277 p.

XU, C. A Preliminary Spatial Distribution Analysis of Landslides Triggered by the 2010 Haiti Earthquake. **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**, v. 3, p. 1-9, 2014. DOI 10.1007/978-3-319-04996-0_29.

