

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

MAURO GUSTAVO REESE FILHO

**Efeitos na costa brasileira ocasionados pelos processos vulcânicos e de
movimentos de massa na Ilha de La Palma – Arquipélago das Canárias**

CURITIBA

2017

MAURO GUSTAVO REESE FILHO

Efeitos na costa brasileira ocasionados pelos processos vulcânicos e de movimentos de massa na Ilha de La Palma – Arquipélago das Canárias

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina de Souza

CURITIBA

2017

Dedicatória

À população brasileira, principal propósito quanto a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãs que se mostraram presentes, dando todo o apoio necessário e entendendo momentos em que tive que me ausentar para realização deste;

À Professora Doutora Maria Cristina de Souza, responsável pelo meu fascínio pela geologia ambiental e por todos os ensinamentos na trilha geológica;

À geóloga Ana Paula Cezario, que me instruiu quanto ao uso de programas de modelagem de tsunamis.

RESUMO

O oceano Atlântico não é famoso pela sua capacidade de gerar tsunamis, porém sabe-se que um tsunami pode atingir o Brasil. Localizado no Arquipélago das Canárias, Ilha de La Palma, o vulcão ativo Cumbre Vieja é o agente responsável quanto a este evento. Estima-se que a próxima erupção poderá desestabilizar a encosta da ilha devido a fatores como declividade do vulcão, volume de material mobilizado, fatores climáticos e principalmente, a uma zona de fraqueza existente que facilitará a ocorrência do movimento de massa. Este movimento por sua vez, poderá ser capaz de gerar um tsunami que percorrerá distâncias transatlânticas e que atingirá o praticamente todos os países banhados pelo oceano Atlântico. A partir da modelagem de tal evento, obteve-se a informação que toda a costa brasileira será afetada. A possibilidade de ocorrência deste evento por si só deveria ser razão para a prevenção de todo os tipos de danos na costa brasileira, porém até o momento nada foi feito. A falta de informação é a principal causadora deste problema, pois inclusive no meio geológico muitas pessoas não sabem sobre tal fato. Toda a população costeira deve ser conscientizada, em especial toda a população costeira do norte e nordeste do Brasil, pois são os principais afetados, e assim evitaremos danos materiais e pessoais. Estudos mais recentes dizem que as chances de ocorrência são remotas e longínquas, no entanto, o estabelecimento de sistemas de alarme que possibilitam a evacuação de áreas é justificável quando se trata de vidas humanas.

Palavras chave: Tsunami, Cumbre Vieja, Ilha de La Palma, movimentos de massa, Ilhas Canárias.

ABSTRACT

The Atlantic Ocean is not famous by its capacity to generate tsunamis, however it is known that a tsunami can hit Brazil. Located in the Canary Archipelago - La Palma Island, the active volcano Cumbre Vieja is responsible about the event. It is expected that the next eruption could be able to destabilize the island hillside due to factors as the hillside declivity, volume of the mobilized material, climatic factors and mainly, a zone of weakness that will facilitate the occurrence of the landslide. This landslide could be able to generate a tsunami that can go through transatlantic distances and that will hit practically all the coastal countries at the Atlantic Ocean. From the modeling of such event, it was obtained the information that all the Brazilian coast will be affected. The possibility of occurrence of this event should be considered as a reason to prevent all types of damage to the Brazilian coast, nonetheless no procedure was taken. The lack of information is the central causer of this problem, because even in the geology community a lot of people do not know about this fact. All the coastal population should be aware, especially Brazil's north and northeast coastal population, because they would be the most affected, and then the material and personal damage will be avoided. More recent studies say that the chances of happening are remote and far, however, the establishment of alarm systems that make the evacuation of areas possible is justifiable to save human lives.

Keywords: Tsunami, Cumbre Vieja, La Palma Island, landslide, Canary Islands.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização do Arquipélago das Canárias, em vermelho e a relação de proximidade com a costa norte brasileira.2
- Figura 2: Perspectiva de distância entre a Ilha de La Palma, agente responsável do tsunami e a cidade de São Luís no Maranhão. A distância adotada medida é de 4462,11km.....3
- Figura 3: Arquipélago das Canárias, formado por ilhas de origem vulcânica, com alguns vulcões atualmente ativos.A Ilha de La Palma fica localizada a extremo oeste do arquipélago, a qual é foco deste estudo.....3
- Figura 4: Estimativa de tempo de chegada da onda em 6 horas para a costa norte brasileira, atingindo com maior intensidade as cidades costeiras do região norte do Brasil.6
- Figura 5: Mapa Político Brasileiro, onde se pode ressaltar os estados mais atingidos na região nordeste e norte, segundo as estimativas de Ward & Day (2001).....7
- Figura 6: Cidade de Macapá, banhada pelo rio Amazonas e próxima o suficiente da costa para ser afetada pelo tsunami8
- Figura 7: Foto de satélite da Ilha de La Palma, com evidência para a zona de fraqueza da ilha em vermelho e o vulcão Cumbre Vieja em branco..9
- Figura 8: Geologia da Ilha de La Palma. 10
- Figura 9: Simulação ainda próxima da Ilha de La Palma, 30 minutos após o evento de deslizamento na ilha. Os contornos vermelhos correspondem a altura em que a onda chegará..... 12
- Figura 10: Simulação aproximadamente 6 horas após o evento de deslizamento, onde a costa brasileira começa a ser atingida. 12

Figura 11: Mapa de simulação de tempo de chegada do tsunami para a costa brasileira com escala em horas, onde os contornos em preto representam a estimativas de tempo para a onda atingir tal local.....	15
Figura 12: Batimetria do Continente Sul-americano com escala em metros, é possível notar os valores muito baixos nas regiões costeiras brasileiras.	17
Figura 13: Cidade de Natal no Rio Grande do Norte, onde as edificações estão localizadas muito próximas a linha de costa.....	18
Figura 14: Estimativa de tempo de chegada (em horas) do tsunami nas regiões próximas à Ilha de La Palma (em vermelho), com contornos de tempo em preto. Detalhe para as regiões afetadas após uma hora do evento, em que todo o Arquipélago das Canárias e uma porção da costa africana já foi atingida..	18
Figura 15: Cidade de Fortaleza, no Ceará, onde além das edificações não respeitarem a distância mínima da linha de costa, existem favelas muito próximas a costa. Estas serão mais facilmente destruídas pela tsunami.....	20
Figura 16: Presença de hotéis de luxo na costa da cidade de fortaleza, no Ceará.	21
Figura 17: Iceberg carregado pela onda, evidenciando o poder do tsunami.	22

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
1.2. CONTEXTO E PROBLEMA	5
1.3. OBJETIVOS	8
2. REVISÃO TEÓRICA	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
4. RESULTADOS	13
5. DISCUSSÃO	19
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	24
REFERÊNCIAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

Tsunamis são ondas com potencial destrutivo massivo e elas não são geradas exclusivamente por terremotos, eventos como a erupção de um vulcão, colapso de uma ilha e movimentos de massa em geral podem ser geradores também. No caso de tsunamis gerados por movimentos de massa, muitas vezes o desencadeamento do movimento se dá pela ocorrência de um terremoto.

O Oceano Atlântico de fato não é conhecido pelo seu potencial de geração de tsunamis, apresentando baixo índice de ocorrência se comparado ao Oceano Índico e Pacífico por exemplo. No entanto sabe-se da possibilidade de ocorrência de um tsunami transoceânico no atlântico e que este poderá atingir a costa brasileira.

Localizada no Arquipélago das Canárias (Figura 1), pertencente a Espanha, a Ilha de La Palma foi originada por uma sucessão de erupções do vulcão Cumbre Vieja. Este vulcão representa um risco para o Brasil, devido a sua localização, posição do vulcão e distância até a costa brasileira (Figura 2). A Ilha de La Palma se localiza no extremo oeste deste arquipélago (Figura 3). Além do Brasil, diversos outros países serão atingidos pelo tsunami, como: os países da costa leste do continente norte americano, da américa central e da costa norte e leste do continente sul-americano, os países da costa oeste da Europa e os países da costa oeste da África. Analisando-se as fotos de satélite da região, nota-se uma grande fratura na Ilha de La Palma. A próxima erupção deste vulcão poderá desestabilizar a encosta da ilha, e devido a esta grade sutura, irá ocorrer um deslizamento massivo de rochas e materiais diversos. Este deslizamento por sua vez, moverá grande quantidade de material para o oceano, gerando uma série de Tsunamis de escala global.



Figura 1: Localização do Arquipélago das Canárias, em vermelho e a relação de proximidade com a costa norte brasileira. Fonte: Adaptado de Google Earth.

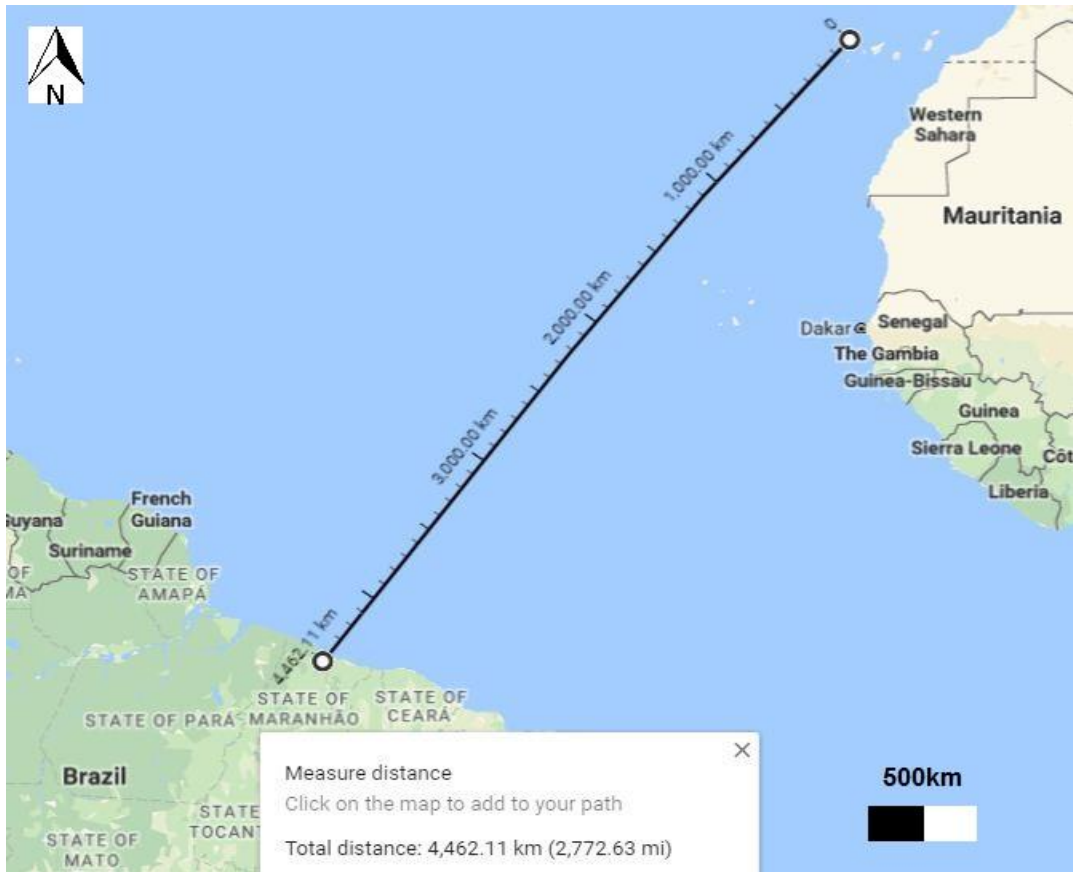


Figura 2: Perspectiva de distância entre a Ilha de La Palma, agente responsável do tsunami e a cidade de São Luís no Maranhão. A distância adotada medida é de 4462,11km. Fonte: Adaptado de Google Earth.



Figura 3: Arquipélago das Canárias, formado por ilhas de origem vulcânica, com alguns vulcões atualmente ativos. A Ilha de La Palma fica localizada a extremo oeste do arquipélago, a qual é foco deste estudo. Fonte: Adaptado de Google Earth.

Eventos como este são comuns em ilhas vulcânicas. Segundo Abadie *et al.* (2012), há evidências geológicas claras de deslizamentos paleo-submarinos com

volume de 100km³ nos arredores das Ilhas Canárias. Day *et al.* (1999) calcula que os tsunamis que poderão ser gerados no caso apresentado por este trabalho serão umas das maiores da história, chegando até 400m de altura. Nas américas, poderão chegar com aproximadamente 10 a 25m de altura (Ward & Day, 2001). Para Wynn, (2012), os tsunamis terão dimensões menores, isto porque ao analisar os turbiditos relacionados aos processos de tsunami, foram associados diversos eventos de deslizamento de menor proporção e não apenas um evento catastrófico. O presente trabalho pretende apresentar uma simulação de tempo para chegada da onda, locais atingidos, velocidade da onda e distância percorrida, além de analisar os efeitos deste evento na costa brasileira e propor medidas preventivas. O tema foi escolhido devido à falta de informação apresentada para a população brasileira, pois mesmo sabendo do potencial destruidor deste tipo de onda, muitos acreditam que o Brasil está em uma realidade muito distante quando se trata de tsunamis, ao contrário de países como o Japão em que terremotos e tsunamis são frequentes. No registro geológico, observa-se diversas rochas chamadas “tsunamitos” ao redor do mundo. Segundo Ward & Day (2001), as regiões tectonicamente estáveis e que não passaram por eventos de glaciação como o oeste da África, sudeste dos Estados Unidos, Nordeste do Brasil e a plataforma carbonática das Bahamas são lugares interessantes para a procura deste tipo de rochas, devido a possibilidade de preservação destas. Analisando a dimensão de blocos de rochas nestes “tsunamitos”, sabe-se o poder elevado de carreamento de ondas desse porte e também do seu poder destrutivo. Devido a esta característica da onda, pretende-se conscientizar a população e órgãos públicos quanto a possibilidade de ocorrência deste tsunami no Brasil, pois um evento deste tipo seria caótico para a situação de despreparo do país.

Para os geólogos, é esperado que se saiba que tsunamis não são geradas apenas por terremotos. Porém quando damos um passo para fora deste mundo e o assunto é tratado com a população brasileira, é possível observar que há uma sabedoria falsa entre de que tsunamis apenas são geradas por terremotos e que por estarmos longe da convergência de placas tectônicas, estamos seguros. Sabe-se que a abordagem do tema tsunamis é complexa e distante para a população brasileira, pois não se trata de um evento relativamente comum como em outros países do mundo. No entanto, uma vez que a população seja conscientizada sobre a possibilidade, pretende-se propor medidas preventivas em relação a perdas humanas,

como desocupação de áreas. Isto preveniria danos humanos, porém é esperado que danificações materiais ocorram, prejudicando a vida dos moradores da região e também afetando de forma explícita o turismo.

Além do caso das Ilhas Canárias, existem outros locais caracterizados como potenciais geradores de tsunamis no atlântico, em sua grande maioria ocorrendo como vulcões submarinos e outros locais propensos a movimentos de massa de diversas naturezas. Sabe-se de alguns no Brasil inclusive.

1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O foco deste estudo ocorre no Arquipélago das Canárias (Figura 1), localizado a noroeste do Saara ocidental, mais precisamente na Ilha de La Palma (Figura 3), uma ilha vulcânica originada por uma sucessão de erupções, que ocorre no extremo oeste deste arquipélago. O vulcão Cumbre Vieja está localizado na porção sul da Ilha de La Palma, com coordenadas DMS 28°34'0"N, 17°50'0"W e UTM 28R 222829 3163256.

1.2. CONTEXTO E PROBLEMA

O tema foi escolhido devido à falta de informação no Brasil em relação a este evento. Considerando-se a quantidade de material que pode ser lançada ao mar, sua velocidade e inclinação da encosta da ilha, há possibilidade de a onda cruzar o oceano atlântico e atingir a costa brasileira. Segundo as estimativas de Ward & Day (2001) (Figura 4), as costas norte e nordeste sofrerão as maiores consequências devido à localização geográfica (Figura 5). Até mesmo as cidades mais afastadas da costa, porém com entranças em baías ou margeadas pelo rio Amazonas como o caso de Macapá no estado do Amapá (Figura 6), serão atingidas.

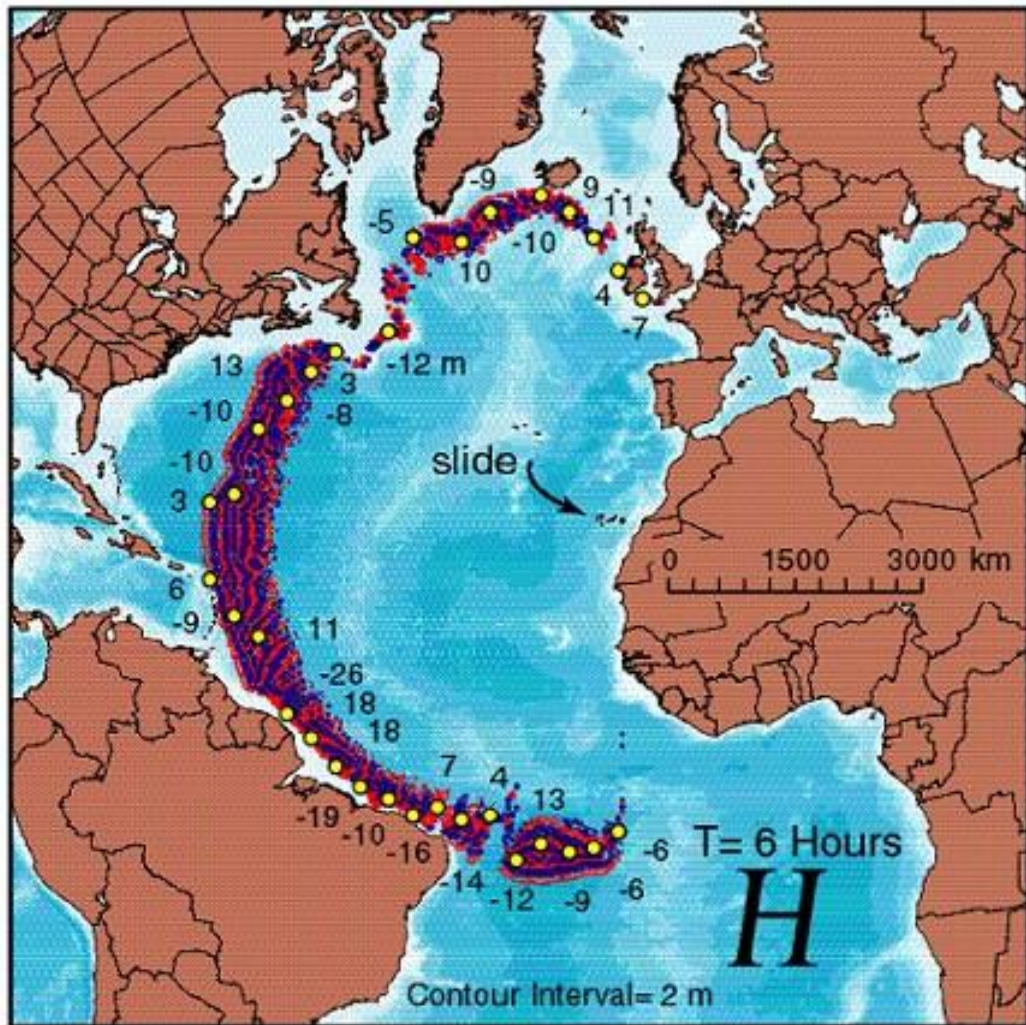


Figura 4: Estimativa de tempo de chegada da onda em 6 horas para a costa norte brasileira, atingindo com maior intensidade as cidades costeiras do região norte do Brasil. Fonte: Ward & Day (2001).



Figura 5: Mapa Político Brasileiro, onde se pode ressaltar os estados mais atingidos na região nordeste e norte, segundo as estimativas de Ward & Day (2001). Fonte: IBGE.



Figura 6: Cidade de Macapá, banhada pelo rio Amazonas e próxima o suficiente da costa para ser afetada pelo tsunami. Fonte: <http://selesnafes.com/2016/06/conferencia-vai-propor-mudancas-no-plano-diretor-de-macapa/>

1.3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste na apresentação de uma modelagem do tsunami originado na Ilha de La Palma, determinando as características da onda que atingirá o Brasil através dos resultados obtidos. Com estas informações, pretende-se alertar e conscientizar a população e órgãos governamentais sobre a possibilidade de ocorrência do evento.

2. REVISÃO TEÓRICA

O Arquipélago das Canárias está localizado no Atlântico Norte a noroeste do Saara Ocidental, e a Ilha de La Palma corresponde a ilha mais a oeste deste arquipélago (Figura 03). Na porção sul da Ilha de La Palma existe o vulcão Cumbre Vieja, com cume de 1949m, este entrou em erupção duas vezes recentemente, em 1949 e 1971. Observa-

se também que há um uma fratura de 5km de extensão com direção N-S a norte do vulcão, que corta grande parte da ilha. Para Day *et al.* (1999) e Ward & Day (2001), esta corresponde a uma zona de fraqueza da ilha, onde o deslizamento poderá ocorrer com maior facilidade (Figura 7). A origem desta fissura se deu no evento de erupção vulcânica do Cumbre Vieja em 1949. A geologia local é predominantemente vulcânica e toda a parte sul da ilha é composta por rochas originadas durante erupções do vulcão Cumbre Vieja, Day *et al.* (1999) (Figura 8).

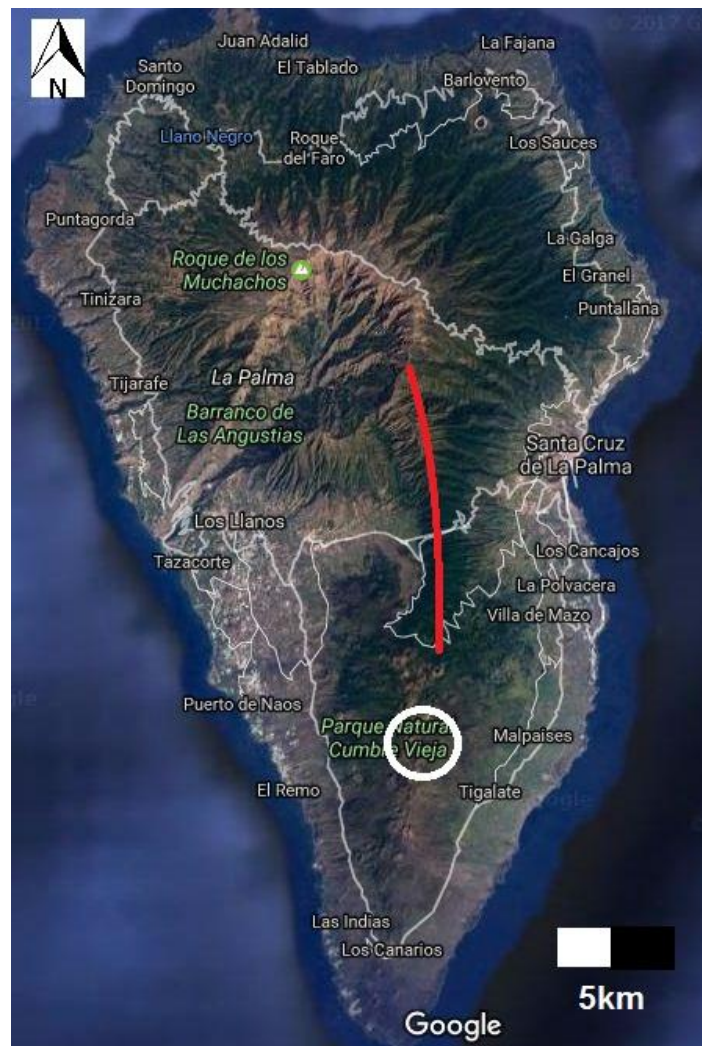


Figura 7: Foto de satélite da Ilha de La Palma, com evidência para a zona de fraqueza da ilha em vermelho e o vulcão Cumbre Vieja em branco. Fonte: Google Earth.

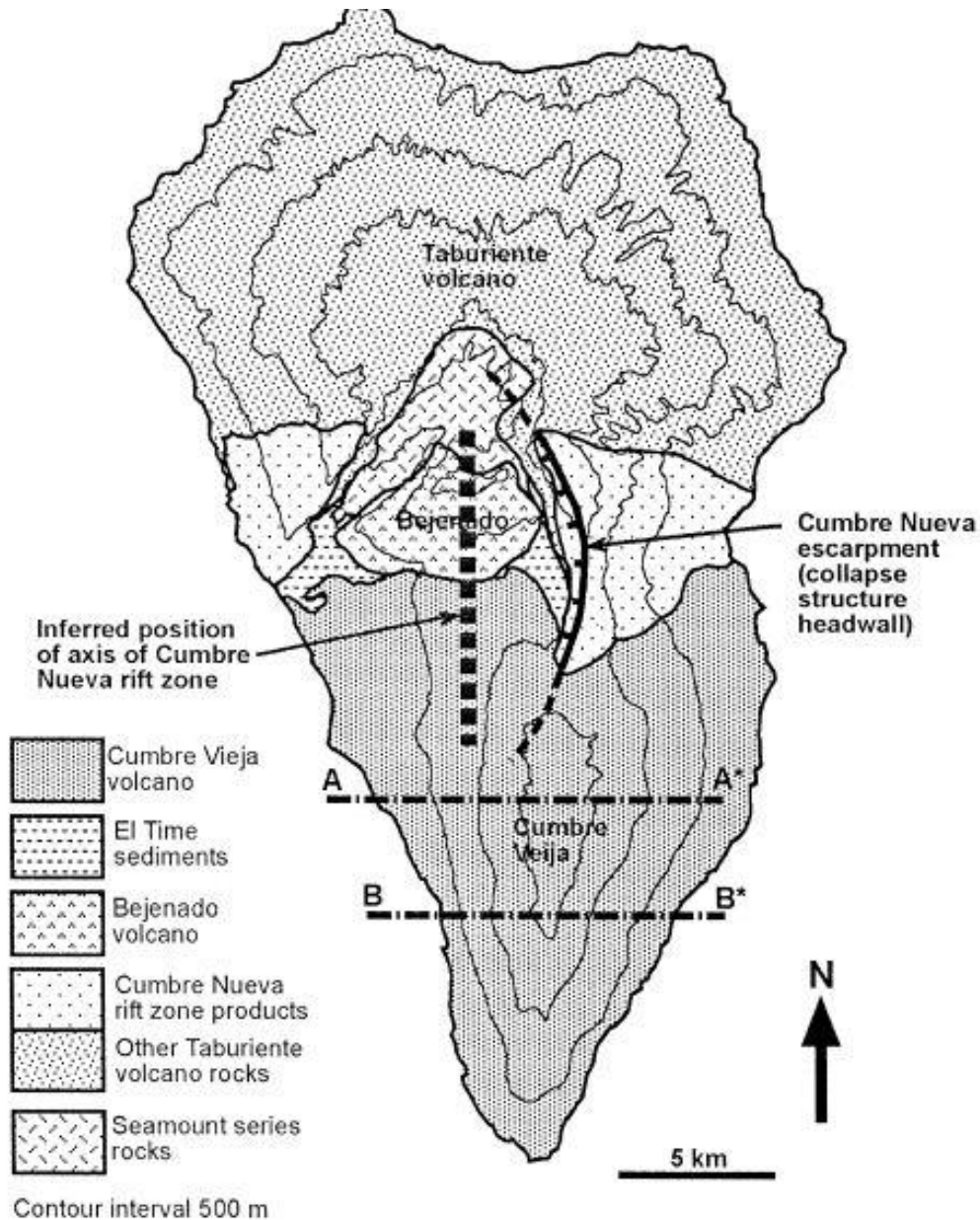


Figura 8: Geologia da Ilha de La Palma. Fonte: Day *et al.* (1999).

Há diversos trabalhos que contemplam o tema da possibilidade de deslizamento e geração de tsunami quando houver a erupção do Cumbre Vieja, dentre eles: Day *et al.* (1999), Ward & Day (2001), González *et al.* (2010) e Tehranirad *et al.* (2015). Há propostas distintas de autores com relação a proporção em que a onda pode ter. Inicialmente acreditava-se em um evento de proporções imensas, hoje em dia há também estudos como o de Løvholt (2008), que dizem que este evento terá proporções menos calamitosas,

porém ainda destruirá as Ilhas Canárias e causará danos a Europa, África e Américas (Ward & Day, 2001).

Para Ward & Day (2001), a erupção resultará em um colapso com volumes de até 500km³ de rocha, sendo movimentadas em direção oeste por 60km a uma velocidade de 360 km/h e estas ondas chegarão as américas com 10 a 25m de altura. A dimensão do tsunami gerado depende da quantidade de material lançado ao oceano após o deslizamento. Existem diversas evidências de depósitos de rochas formadas por tsunamis e estes se preservam melhor em condições subaquáticas. Porém Ward & Day (2001) sugerem que os depósitos em terra devem ser estudados com grande detalhe, principalmente em regiões onde a preservação destes é superior, como nas Ilha Havaianas e Ilhas Canárias.

Para Løvholt (2008), a probabilidade de ocorrer um evento de extrema magnitude como é abordado por Ward & Day (2001) é considerada pequena. Porém, as consequências catastróficas do tsunami gerado requerem atenção. A tentativa de modelagem de um evento de magnitude catastrófica como esta é de extrema dificuldade devido a diversidade e complexidade de modelos a serem utilizados (Løvholt, 2008).

Analisando-se as simulações das ondas produzidas pelo deslizamento (Figura 9), os contornos vermelhos correspondem as alturas em que as ondas podem chegar, com relação ao nível do mar. Observa-se que após meia hora do deslizamento, as ondas chegarão até 188m de altura. Quando chegarem nas américas, estas ondas poderão chegar a 25m (Ward & Day, 2001). A primeira região a ser atingida da costa brasileira é o Rio Grande do Norte, aproximadamente 6 horas após a geração da onda (Figura 10).

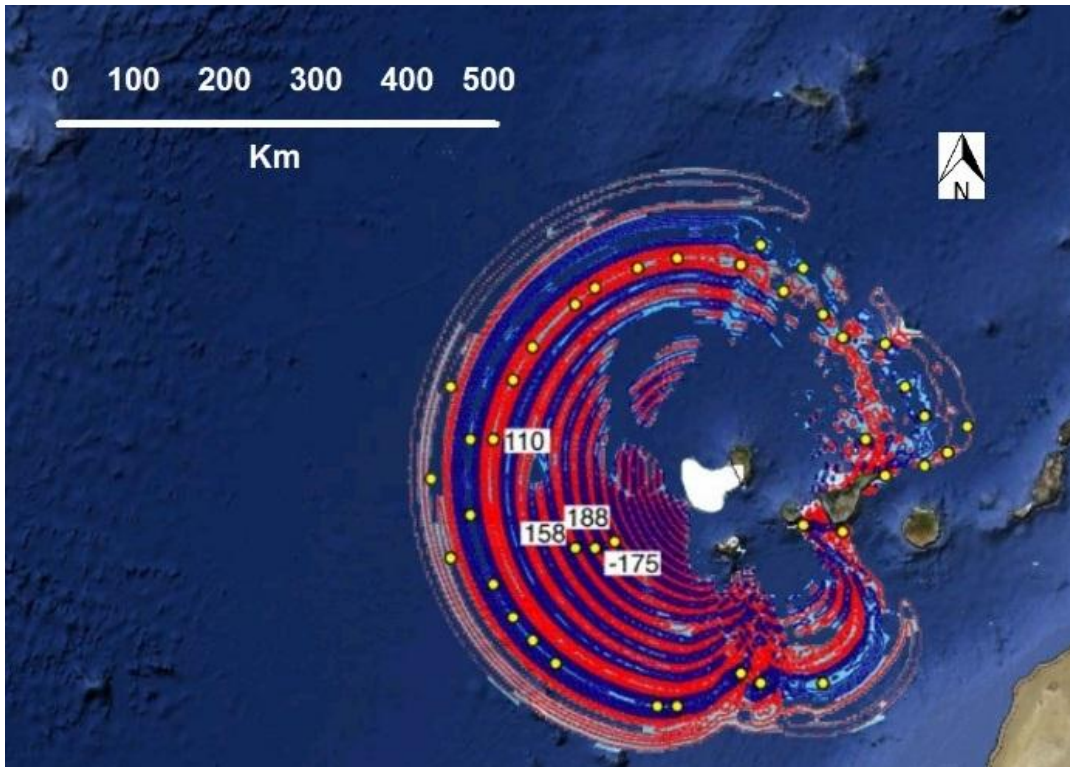


Figura 9: Simulação ainda próxima da Ilha de La Palma, 30 minutos após o evento de deslizamento na ilha. Os contornos vermelhos correspondem a altura em que a onda chegará. Fonte: <http://verdademundial.com.br/2015/05/mega-tsunami-pode-atingir-o-brasil-vulcao-cumbre-vieja-2>

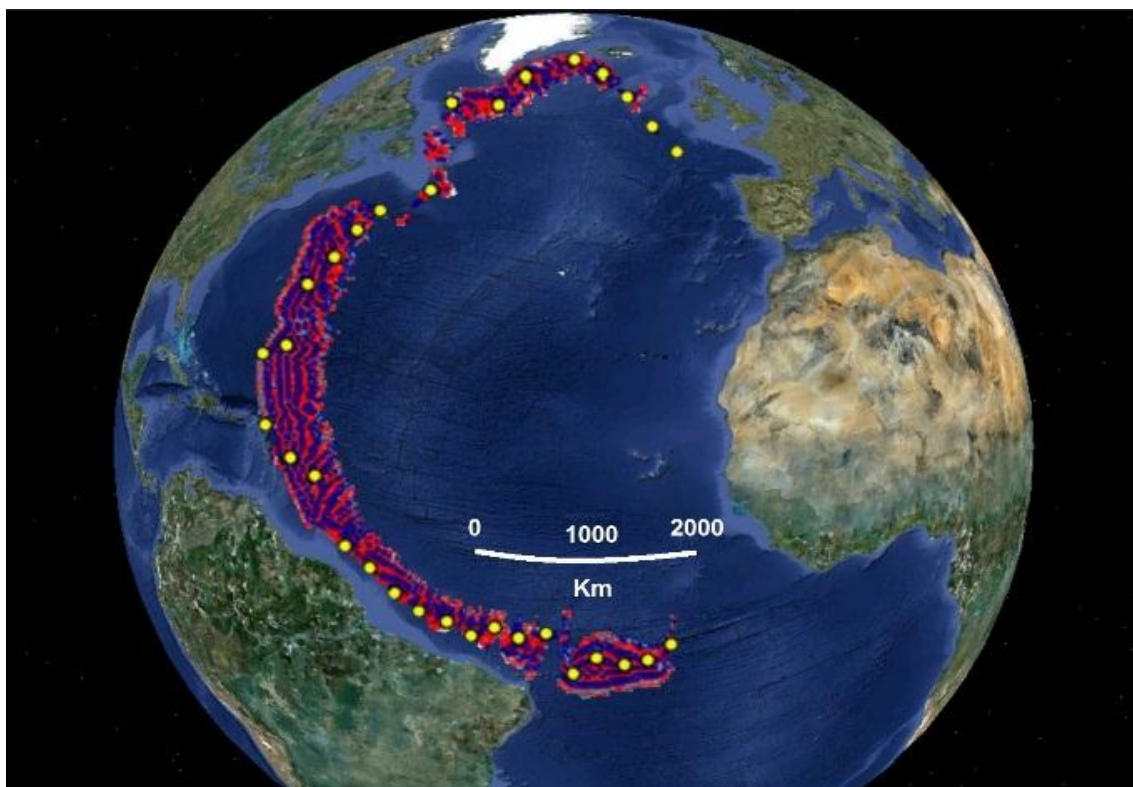


Figura 10: Simulação aproximadamente 6 horas após o evento de deslizamento, onde a costa brasileira começa a ser atingida. Fonte: <http://verdademundial.com.br/2015/05/mega-tsunami-pode-atingir-o-brasil-vulcao-cumbre-vieja-2>

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos usados foram: a modelagem do tsunami e a comparação através da análise de dados, informações de trabalhos científicos anteriores e estudos de caso de tsunamis que já ocorreram. A análise da probabilidade de ocorrência foi realizada confrontando ideias de diferentes trabalhos já apresentados e os danos relacionados foram estimados levando em conta majoritariamente o volume de material lançado ao mar, sua velocidade e a declividade da encosta do Cumbre Vieja. Estes parâmetros variam muito conforme os dados utilizados de diferentes autores, para Ward & Day (2001), os valores de volume de rocha atingem maior expressividade, com 500 km³.

A modelagem do tsunami ocorreu através do *geosoftware MIRONE*, que consiste em um framework do programa *MATLAB*. Este primeiro possibilita a simulação e manipulação de diversos grids batimétricos e de deformação inicial.

As simulações de onda ocorreram a partir da geração de um grid batimétrico para a área de estudo, disponível no site da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), com resolução de 1 minuto. Em seguida, foi necessária a criação de um grid de deformação inicial. O evento estudado consiste em um tsunami gerado por movimento de massa, no entanto não foi possível obter acesso a nenhum programa gratuito que simule tsunamis gerados de tal forma. Para contornar o problema, usou-se a deformação inicial obtida através de uma falha, com características similares da fratura existente da Ilha de La Palma, como a extensão, direção e mergulho. Com isso, foi possível saber as regiões atingidas pelo tsunami, estimar o tempo de chegada a estes locais, a distância percorrida e a velocidade da onda. Sabendo-se destes parâmetros, assumiu-se distintas alturas de onda para estimar danos à costa brasileira.

4. RESULTADOS

A simulação do tsunami permitiu inicialmente uma visualização de que quais estados serão atingidos (Figura 11), a conclusão é que todos os estados banhados pelo oceano atlântico serão afetados. Também foi possível criar uma estimativa de tempo de chegada da primeira onda para toda a costa brasileira (Figura 11), os contornos em cor preta representam o tempo que a primeira onda irá demorar para atingir tal local. O Rio Grande do Norte por exemplo, seria o primeiro a receber a onda, com pouco mais de 6 horas depois da geração da dela. As regiões mais protegidas, como as localizadas em baías, também serão afetadas, este é o caso de São Luís no Maranhão que receberá a onda rapidamente, mas também é o caso de cidades mais afastadas como Guaratuba no Paraná. A cidade de Macapá, mesmo sendo que é banhada pelo rio Amazonas também será atingida, com 10 a 15 horas de tempo estimado.

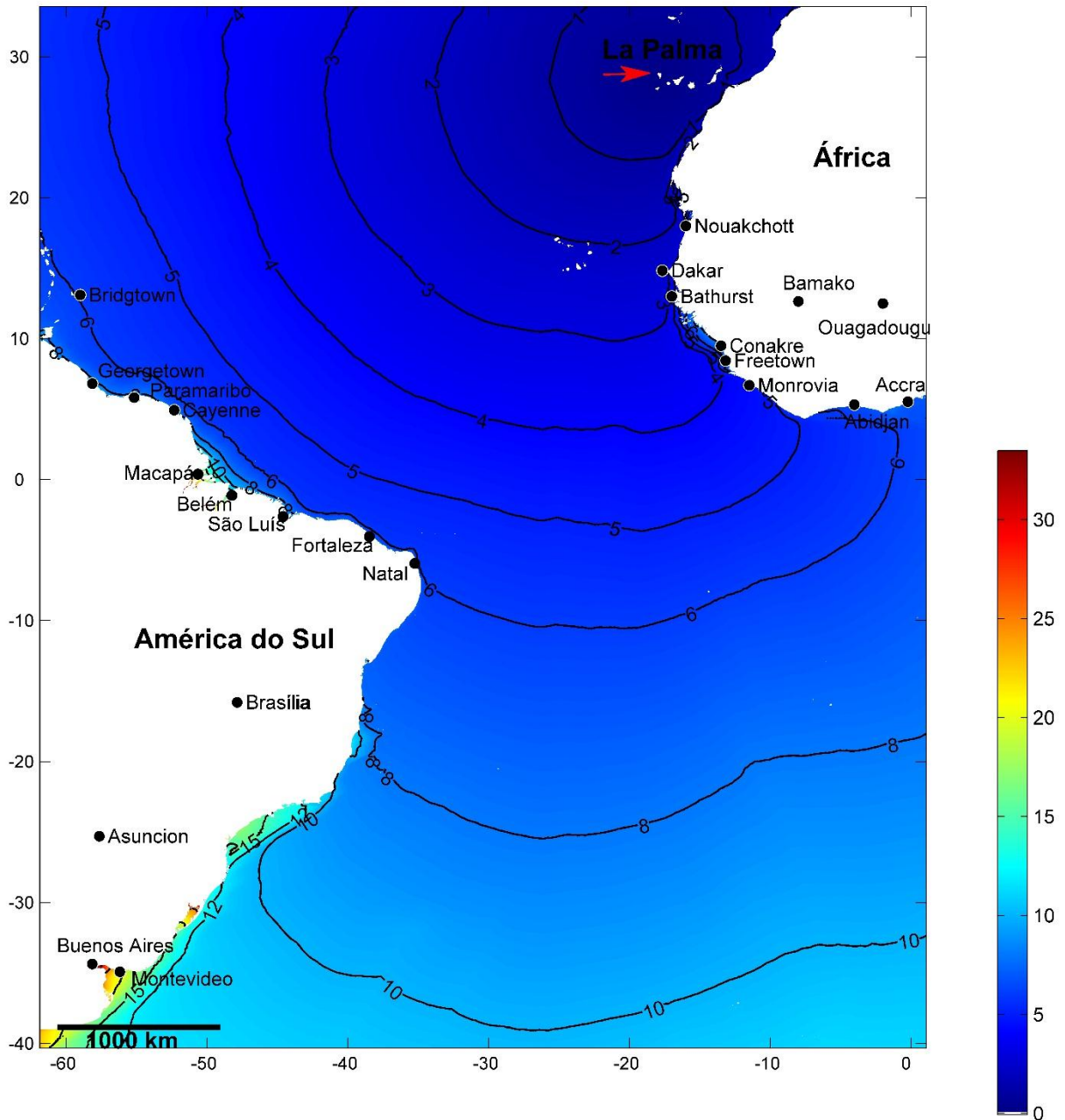


Figura 11: Mapa de simulação de tempo de chegada do tsunami para a costa brasileira com escala em horas, onde os contornos em preto representam a estimativas de tempo para a onda atingir tal local. Fonte: Autor.

As ondas percorreram distância transatlânticas, onde a região mais próxima a zona de dano dela resultou em 4167km, no Nordeste e a região mais distante resultou em 7774km, no Sul. A partir dos dados de distância percorrida e tempo para chegada da onda na costa brasileira, foi possível estimar uma velocidade média do tsunami de 690km/h. Com esta velocidade, até mesmo ondas com alturas de 1m que atingirem a

costa brasileira causariam danos, devido a costa brasileira ter batimetrias muito baixas (Figura 12), profundidade de mar rasa e somado a esses fatores, o fato de existirem diversos locais com edificações extremamente próximas ao oceano (Figura 13). Os estados localizados mais ao sul, como São Paulo e Rio de Janeiro, receberão as ondas entre 10 a 18 horas depois do início do evento.

Vale lembrar que não só o Brasil será afetado pela Tsunami, todo o arquipélago das Canárias e parte da costa africana já será atingida após uma hora do início do evento (Figura 14).

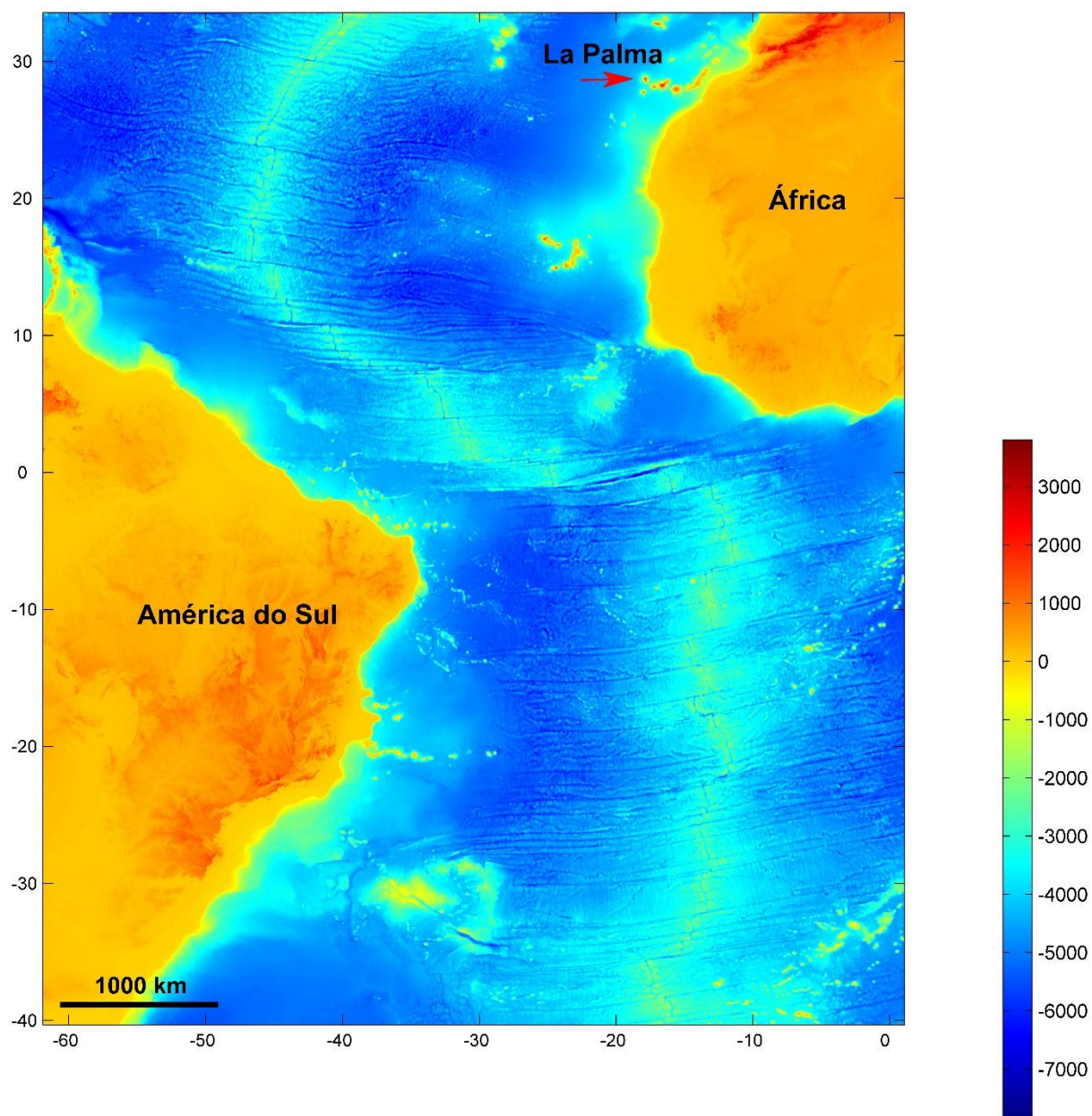


Figura 12: Batimetria do Continente Sul-americano com escala em metros, é possível notar os valores muito baixos nas regiões costeiras brasileiras. Fonte: Autor.



Figura 13: Cidade de Natal no Rio Grande do Norte, onde as edificações estão localizadas muito próximas a linha de costa. Fonte: <http://www.guiadoturismobrasil.com/cidade/RN/979/natal>

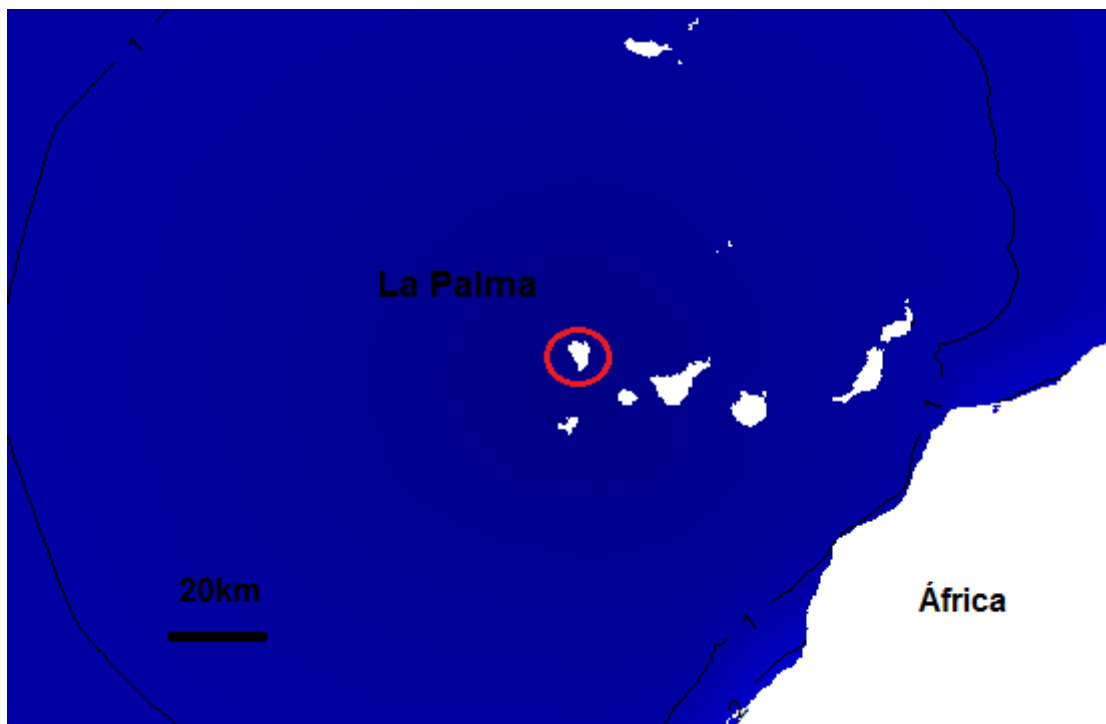


Figura 14: Estimativa de tempo de chegada (em horas) do tsunami nas regiões próximas à Ilha de La Palma (em vermelho), com contornos de tempo em preto. Detalhe para as regiões afetadas após uma hora do evento, em que todo o Arquipélago das Canárias e uma porção da costa africana já foi atingida. Fonte: Autor.

5. DISCUSSÃO

A onda gerada tem potencial de destruição elevado e sabe-se que há grande concentração populacional na costa brasileira. Ainda assim, não existe nenhuma medida que foi tomada e não há nenhum tipo de planejamento quanto a possibilidade de ocorrência deste evento para a costa do Brasil. Mesmo que seja remota e longínqua a possibilidade da existência deste tsunami, foi mostrado através da simulação que se o evento ocorrer, ele atingirá todo o Brasil. Deste modo, vidas podem estar comprometidas, assim como a infraestrutura costeira de muitas localidades.

Observa-se na Figura 13 e 15 a existência de diversas moradias muito próximas ao mar, inclusive não respeitando a distância mínima da linha de costa e sem preservação da restinga. Diversas comunidades pesqueiras e edificações de má qualidade estão localizadas próximas também. A Figura 15 retrata um contraste social onde há uma favela que faz divisa com edifícios e hotéis direcionados às altas classes sociais na cidade de Fortaleza. Vale lembrar que o fato de uma favela estar localizada tão próxima da costa ampliará muito os danos causados pelo tsunami. Isto porque a baixa qualidade de habitação, edificações com características frágeis, não planejadas e construídas com uma proximidade entre elas muito pequena, resultará em danos mais severos. Além disso, é importante considerar que uma grande densidade como populacional irá dificultar a execução de planos de fuga em períodos de iminência do tsunami.



Figura 15: Cidade de Fortaleza, no Ceará, onde além das edificações não respeitarem a distância mínima da linha de costa, existem favelas muito próximas a costa. Estas serão mais facilmente destruídas pela tsunami. Fonte: <https://www.accorhotels.com/gb/hotel-1142-ibis-fortaleza-praia-de-iracema/index.shtml>

Além dos danos materiais e riscos de vida que este evento pode causar, deve-se considerar também os danos ao turismo de diversas regiões, que inclusive arrecadam grande parte da sua renda através deste meio. Os hotéis presentes nas regiões costeiras (Figura 16), apesar de terem boa qualidade de infraestrutura, ainda assim serão afetados pelo tsunami. Danos ao andar térreo e garagens por exemplos, serão esperados.



Figura 16: Presença de hotéis de luxo na costa da cidade de Fortaleza, no Ceará. Fonte: <https://omensageiro77.wordpress.com/2017/03/03/fortaleza-epicentro-da-costa-norte-do-brasil/>

Reconsiderando a possibilidade de ocorrência deste evento, sabe-se que é fato que a perda de massa através de movimentos de massa é algo que se espera durante o desenvolvimento de uma ilha vulcânica (Labazuy 1996, Masson *et al.* 2002; Moore *et al.* 1989). No entanto Garcia & Jones (2010) ressaltam que a evolução de ilhas quanto à perda de massa depende da velocidade da litosfera que aloja a ilha. As Ilhas Havaianas por exemplo ocorrem em litosfera de movimentação rápida, enquanto que as Ilhas Canárias se encontram em litosfera de movimentação lenta. O que pode sugerir que o evento abordado dificilmente ocorra ou ocorra em proporções reduzidas.

No entanto, notou-se em um caso de tsunami na Groenlândia o poder que uma onda deste tipo pode ter. Esta onda teve proporções reduzidas quando comparado às estimativas propostas por diferentes autores no caso estudado neste trabalho, porém mesmo assim teve resultados expressivos. No dia 17 de junho de 2017 ocorreu na

Groenlândia o tsunami citado. Este atingiu 90m de altura e foi capaz de destruir grandes porções das geleiras. Esta onda aparentemente foi gerada por um movimento de massa e foi capaz de varrer cidades, destruindo casas e arrastando 4 pessoas. Este evento foi capaz de causar muitos danos à Groenlândia, então poderíamos imaginar os danos causados por um tsunami da proporção esperada para o caso estudado. É possível averiguar o poder desta onda na figura 17, onde vê-se que ela foi capaz de carrear grandes icebergs junto a si. Segundo Hermann M. Fritz, engenheiro da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Georgia que estudou o caso, este caso ocorreu como um remanescente do movimento de massa que gerou um tsunami em Lituya Bay, no Alaska, que corresponde a maior tsunami que foi capaz de passar por cima de um fjord. Estudos preliminares deste caso mais recente condizem que o volume da onda na Groenlândia pode ter superado o caso de Lituya Bay.



Figura 17: Iceberg carreado pela onda, evidenciando o poder do tsunami. <https://ce.gatech.edu/news/after-recon-trip-researchers-say-greenland-tsunami-june-reached-300-feet-high>

O relatado caso sobre a onda que atingiu a Groenlândia deve servir como alerta. Existe muita incerteza quanto ao tamanho e potencial para destruição para o caso da Ilha de La Palma, autores como Day *et al.* (1999) e Ward & Day (2001)

afirmam que ela gerará ondas transatlânticas e outros como Carracedo *et al.* (2009) afirmam que os deslizamentos ocorrerão de forma lenta, gerando tsunamis menos expressivas. Para estes últimos, não haverá um grande movimento de massa, e sim diversos movimentos de menor escala. Um fator que não pode ser desconsiderado é a existência da fratura de direção N-S na Ilha de La Palma, gerada a erupção do Cumbre Vieja em 1949, que corresponde a um grande fator que pode intensificar e facilitar a ocorrência da onda. Somado a isto, sabe-se que a porosidade das rochas da ilha, tanto vulcânicas quanto sedimentares, favorece a percolação e acumulação de água. Isto caracteriza um outro problema, pois ao saturar os poros de água, o movimento de massa pode ser facilitado. Isto porque ao ocorrer a erupção, a água presente nos poros primários e secundários destas rochas irá entrar em ebulição e aumentar a pressão de poros consideravelmente, desestabilizando ainda mais os flancos da ilha (Day *et al.* 1999, Ward & Day 2001).

Sabe-se que a atividade do vulcão é um fator que deve ser considerado quando analisada a possibilidade e estimativa de tempo para ocorrência do movimento, já que a erupção que será responsável pelo desencadeamento do movimento de massa. Pensando neste quesito, o vulcão Cumbre Vieja representa de fato um perigo para o Brasil devido a sua idade, ele é ativo e muito novo, com as rochas mais antigas originadas por ele sendo datadas como 125ka, (Guillou *et al.* 1998). Isto somado a existência da zona de fraqueza aumenta as chances de a encosta desestabilizar e gerar o movimento.

Com base nas simulações de tempo de chegada das ondas na costa norte e nordeste brasileira, afirma-se que o fator tempo é de enorme preocupação para este evento. A modelagem apresentada neste trabalho resultou em um tempo de chegada do tsunami à costa brasileira de 6 a 7 horas. Se levarmos em conta este tempo, as ondas podem ter seus danos ampliados. Suponha-se que o tsunami seja gerado por volta de 23:00, então ele atingirá a costa brasileira entre às 05:00 e 06:00 horas. Neste horário, grande parte da população ainda se encontrara em seus domicílios dormindo, o que impediria o acesso à informação de que a tsunami estaria a caminho para atingir a costa. Esta suposição corresponde à uma hipótese válida e que deve ser refletida a respeito, pois aumentaria exponencialmente os danos do tsunami.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se afirmar de que o Brasil não está preparado para qualquer tipo de tsunami, mesmo que de pequena escala e, portanto, também não para um evento com potencial elevado como esperada para o evento da Ilha de La Palma.

É extremamente necessário que o Brasil tome medidas preventivas quanto ao evento retratado, pois as modelagens apresentadas neste trabalho indicam que toda a costa brasileira será atingida. Obviamente não se trata de um evento de prioridade máxima para prevenir, e que não se compara a temas importantíssimos que precisam receber atenção, como: a saúde, educação e infraestrutura. Porém, a conscientização da população quanto a possibilidade de ocorrência do tsunami é de suma importância. A sugestão que poderia ser adotada para o governo brasileiro seria um sistema de alarme na iminência do evento. Este sistema precisaria coletar a informação de que o tsunami está vindo e alertar toda a população em zonas de risco com antecedência. Sabe-se que qualquer evento de erupção do Cumbre Vieja poderia resultar no colapso da ilha e geração de tsunami, portanto a predição de quando a próxima erupção ocorrerá faz-se valiosa. Além deste sistema, é de extrema importância que a população costeira saiba identificar os sinais que o tsunami apresenta quando está prestes a ocorrer. Existem diversos sinais de que um tsunami pode estar a caminho. O mais notório é certamente o recuo anômalo do mar sendo ele de maneira rápida, um recuo de grandes distâncias ou uma combinação dos dois. Se isto ocorrer, a população deve saber que tempo para a chegada da onda é curto, por volta de 5 a 10 minutos, o que caracteriza uma urgência para a evacuação do maior número de pessoas possível. Toda a população brasileira deve ter consciência desse sinal que a onda apresenta, pois na ausência desta informação, as pessoas podem até se interessar pelo recuo e se aproximar devido à curiosidade. Outro fato importante a ser considerado é o acesso à informação: se uma pessoa ouviu sobre um movimento de massa ou terremoto que ocorreu próximo à região em que está é muito provável que ela propague a informação. Portanto é interessante que as diversas mídias como a televisão e internet repassem a informação de forma rápida e assim prevenindo a ocorrência de um tsunami e fazendo com que a população brasileira evite regiões costeiras que são vulneráveis ao evento.

Os danos resultantes das ondas na costa brasileira seriam grandes devido ao despreparo do país. Todo o ambiente costeiro seria afetado, perdas humanas ocorreriam, perdas materiais e prejudicariam o turismo nas regiões. A devastação causada seria o primeiro impacto para a população, isto somado ao despreparo e falta de agilidade do país resultaria em meses para a recuperação dos danos na infraestrutura.

As simulações apresentadas neste trabalho visam justificar a importância do tema. Para incrementar as simulações e obter dados com grande acurácia sobre este tema, seria necessária uma maior disponibilidade de *geosoftware*s de modelagens de tsunamis gratuitos, em especial para os tsunamis gerados por movimentos de massa. Além disto, o uso de grids com grande detalhamento do oceano atlântico e em especial da costa brasileira seriam de extrema importância, pois estes, junto a deformação inicial que gera a tsunami, controlam as características da onda gerada. Recomenda-se o uso de computadores com alta capacidade de processamento de dados e grande espaço para armazenamento, a fim de otimizar o tempo para simulação e modelagens e também melhorar a qualidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

Abadie S. M., Harris J. C., Grilli S. T., Fabre R. 2012. Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands): Tsunami source and near field effects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 117. C5

Day S. J., Carracedo J. C., Guillou H., Gravestock P. 1999. Recent structural evolution of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcano flank instability? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 94,135-167.

González P. J., Tiampo K. F., Gamacho A. G. Fernández J. 2010. Shallow flank deformation at Cumbre Vieja volcano (Canary Islands): Implications on the stability of steep-sided volcano flanks at oceanic islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 3-4, 545-557.

Guillou, H., Carracedo, J.C., Day, S.J., 1998. Dating of the upper Pleistocene–Holocene volcanic activity of La Palma using the unspiked K–Ar technique. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 86, 137–149.

Labazuy, P. 1996. Recurrent landslide events on the submarine flank of Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island), in *Volcano Instability on the Earth and Other Planets*, edited by W. J. McGuire et al., *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 110, 295–306.

Løvholt, F., G. Pedersen, and G. Gisler. 2008. Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island, *Journal of Geophysical Research*, 113, C09026.

Masson, D. G., A. Watts, M. Gee, R. Urgeles, N. Mitchell, T. L. Bas, and M. Canals. 2002. Slope failures on the flanks of the Canary Islands, *Earth Sci. Rev.*, 57, 1–35.

Moore, J. G., D. Clague, R. Holcomb, P. Lipman, W. Normark, and M. Torresan. 1989. Prodigious submarine landslides on the Hawaiian ridge, *Journal of Geophysical Research*, 94(B12), 17,465–17,48.

Tehranirad B., Harris J. C., Grilli A. R., Grilli S. T., Abadie S., Kirby J. T., Shi F. 2015. Far-Field Tsunami Impact in the North Atlantic Basin from Large Scale Flank Collapses of the Cumbre Vieja Volcano, La Palma. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 2589-2616.

Ward, S. N., and S. Day. 2001. Cumbre Vieja Volcano—Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3397–3400.

Wynn, R. B., and D. G. Masson. 2003. Canary island landslides and tsunami generation: Can we use turbidite depositis to interpret landslide processes, in *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, editado por J. Locat and J. Mienert, pp.325–332, Kluwer Acad., Dordrecht, Holanda.