

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**TRABALHO DE FORMATURA
N° TF - 24 / 34**

**MAPEAMENTO DE RISCO PARA FLUXOS DE MASSA DO VULCÃO NEVADO
DEL RUIZ, COLÔMBIA**

Aluna: Maithe Fragoso Alvim
Orientadora: Adriana Alves
Coorientador: Vinicius Hector Abud Louro

São Paulo
2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Nanci e Wilson, que sempre me apoiaram incondicionalmente durante todos esses anos e nunca deixaram de acreditar em mim. A minha cachorra, Guinness, que sempre me animou e confortou.

A todos os meus amigos ao longo da graduação: Alana, Danilo, Eduardo, Gabrielle, Giovanni, Isadora, Larissa e Thalita. Pessoas com quem tive momentos maravilhosos e inesquecíveis, sendo a melhor companhia durante os campos. Especialmente ao Danilo e a Larissa, por todo apoio e sentimentos compartilhados ao longo dos anos.

Agradeço também a todos os professores que foram tão importantes durante esta jornada. A Maria Irene por todas as conversas e ensinamentos. A Adriana Alves por ser tão inspiradora e ter aceitado me orientar.

E um agradecimento especial ao Vinicius Louro, pelo amor compartilhado por vulcões, por todas as conversas e conselhos ao longo do tempo, além de sempre estar disposto a ajudar, motivar e confiar em mim.

RESUMO

Movimentos de massa vulcânicos constituem grande perigo para áreas ao seu entorno, tendo grande potencial destrutivo e capacidade de alcançar longas distâncias em curtos períodos de tempo. O monitoramento constante de edifícios vulcânicos e atualização de seus mapas de riscos é, dessa forma, essencial, visando maior preparo em situações de risco para tomada de decisões. O estratovulcão Nevado del Ruiz apresenta 5.321 metros de altitude, contendo uma extensa e volumosa calota de gelo em seu topo, o que o torna ainda mais perigoso devido ao seu potencial para geração de lahars. Estes fenômenos estão entre os processos vulcânicos mais perigosos a comunidades localizadas nos arredores de corpos vulcânicos ativos, tendo como exemplo o lahar que atingiu a cidade de Armero, Colômbia, em 1985, tirando as vidas de dezenas de milhares de pessoas. Para estudo da área de influência do vulcão foram utilizados sensoriamento remoto multiespectral para a cobertura superficial da área e delimitação de zonas de calor provenientes de atividade vulcânica, radar de abertura sintética (SAR) para análise de topografia – principal fator condicionante de fluxos de massa e regiões mais sujeitas a confiná-los – interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) para o deslocamento e deformação da superfície terrestre, além de modelos simplificados de fluxos de lava e lahar (LaharFlow), junto de trajetórias de dispersão e deposição de cinzas (Ash3D). A combinação de todas essas informações permitiu estabelecer relações entre a geologia local, ação de processos erosivos e áreas do edifício mais prováveis a abrigar perigos vulcânicos, culminando com a confecção de um mapa de perigos atualizado para fluxos de massa advindos do vulcão Nevado del Ruiz, junto da indicação de cidades mais propícias a serem atingidas.

ABSTRACT

Volcanic mass movements pose a significant danger to the surrounding areas, with great destructive potential and the ability to reach long distances in short periods of time. Constant monitoring of volcanic edifices and the updating of their risk maps is therefore essential, aiming for better preparedness in risk situations for decision-making. The stratovolcano Nevado del Ruiz has an elevation of 5,321 meters, with an extensive and voluminous ice cap at its summit, making it even more dangerous due to its potential for generating lahars. These phenomena are among the most hazardous volcanic processes to communities located around active volcanic bodies, with the 1985 lahar that struck the city of Armero, Colombia, resulting in the deaths of tens of thousands of people, as a tragic example. To study the influence area of the volcano, multispectral remote sensing was used to map the surface coverage of the area and delineate heat zones from volcanic activity, synthetic aperture radar (SAR) for topography analysis – the main factor conditioning mass flows and regions more likely to confine them – interferometric synthetic aperture radar (InSAR) for surface displacement and deformation, as well as simplified lava and lahar flow models (LaharFlow), along with ash dispersion and deposition trajectories (Ash3D). The combination of all this information allowed for establishing relationships between local geology, erosive processes, and areas of the edifice most likely to harbor volcanic hazards, culminating in the creation of an updated risk map for mass flows from Nevado del Ruiz, along with an indication of the cities most likely to be affected.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. TERMINOLOGIAS PRINCIPAIS	2
3. GEOLOGIA REGIONAL	3
4. CARACTERÍSTICAS DO VULCÃO NEVADO DEL RUIZ	4
4.1. Períodos Eruptivos	6
5. FATORES CLIMÁTICOS	7
6. PERIGOS VULCÂNICOS	8
6.1. Lahar	8
6.2. Avalanches de Detritos Vulcânicos	10
6.3. Correntes de Densidade Piroclástica	11
6.4. Derrames de Lava	13
6.5. Cinzas Vulcânicas	15
7. ÍNDICE DE EXPLOSIVIDADE VULCÂNICA (VEI)	16
8. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO VULCÂNICO	17
9. MONITORAMENTO ATUAL DO NEVADO DEL RUIZ	19
9.1. Redes de Monitoramento	19
9.2. Estados de Alerta Vulcânico e Boletins	19
9.3. Mapa de Ameaças Vulcânicas Atual	20
10. MATERIAIS E MÉTODOS	21
10.1. Sensoriamento Passivo	22
10.1.1. Sensoriamento Remoto Multiespectral	22
10.1.2. Sensoriamento Remoto Termal	23
10.2. Sensoriamento Ativo	24
10.2.1. Radar de Abertura Sintética (SAR)	24
10.2.2. Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR)	25
10.3. Modelagem	27
10.3.1. LaharFlow	27
10.3.2. Ash3D	29
10.4. Dados Utilizados	29
11. RESULTADOS	30
11.1. Produtos do Sensoriamento Passivo	30
11.1.1. Sensoriamento Remoto Multiespectral	30
11.1.2. Sensoriamento Remoto Termal	32
11.2. Produtos do Sensoriamento Ativo	33
11.2.1. Topografia - SAR	33
11.2.2. Deformação do Terreno - InSAR	38
11.3. Modelagem	40
11.3.1. LaharFlow	40
11.3.2. Ash3D	43
12. MAPA DE PERIGOS VULCÂNICOS E CONCLUSÕES	46
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
14. ANEXOS	53

1. INTRODUÇÃO

O vulcão Nevado del Ruiz se encontra na porção setentrional da Cordilheira Central da Colômbia, inserido na zona de subducção da Placa de Nazca sob a Sul-Americana. Este vulcão se localiza na divisa dos departamentos de Tolima e Caldas, tendo proximidade com várias cidades, como Manizales, a apenas 30 quilômetros de distância, além da capital da Colômbia, Bogotá, a cerca de 140 quilômetros (Fig. 1).

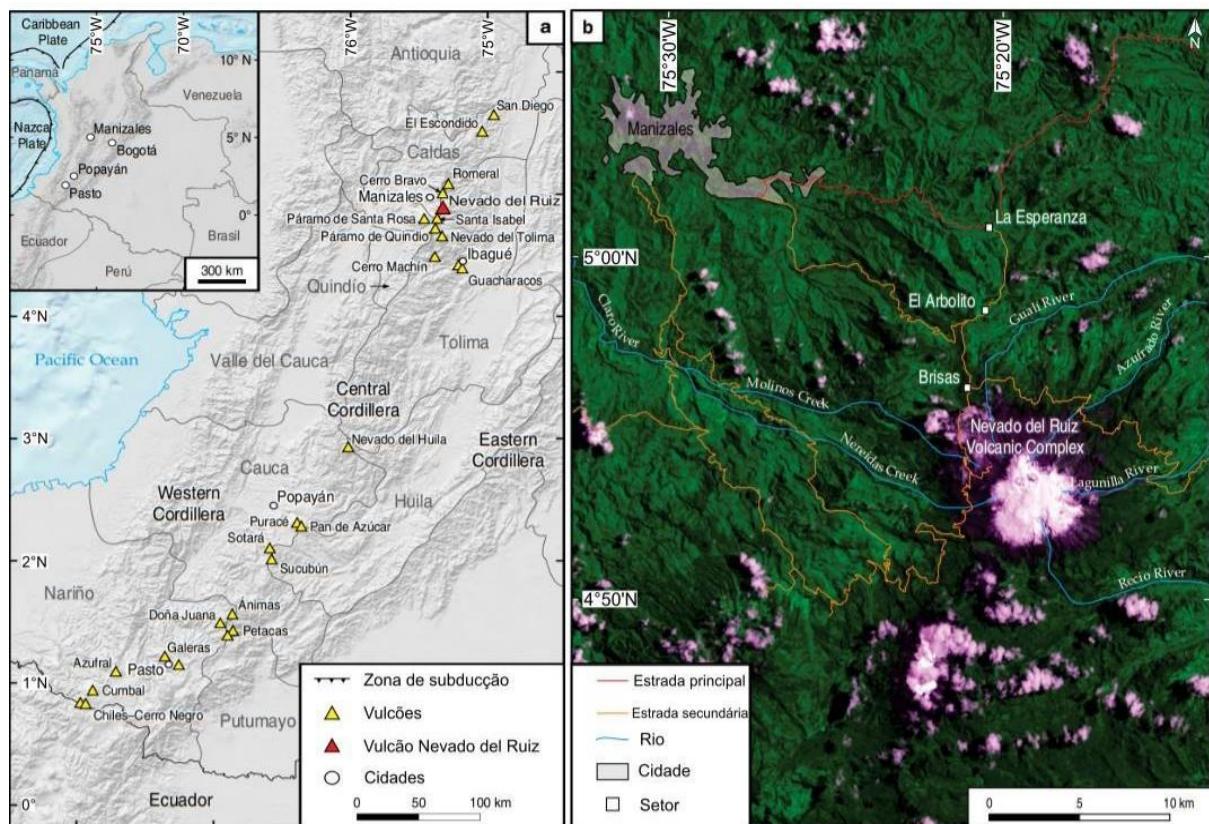


Figura 1. (a) Localização do vulcão Nevado del Ruiz e de vulcões ativos na Colômbia; (b) Proximidade do vulcão Nevado del Ruiz (Nevado del Ruiz Volcanic Complex, no mapa) com a cidade de Manizales (30 km; extraído de Ceballos-Hernández et al., 2020).

Diversos tipos de perigos vulcânicos podem ocorrer associados a estratovulcões, sendo que movimentos de massa são os mais recorrentes e preocupantes, incluindo lahars, correntes de densidade piroclástica, avalanches, desmoronamentos e deslizamentos de rochas e detritos. Lahars exigem atenção especial, dado que o cume do Nevado del Ruiz apresenta uma extensa e volumosa calota de gelo, formando uma grande possível fonte de materiais que alimentam este processo.

Devido aos riscos que os vulcões podem gerar e a grande extensão territorial que pode ser impactada, é necessária a constante atualização de mapas de perigos geológicos para regiões no entorno de edifícios vulcânicos. Tais produtos são críticos para processos de decisões de órgãos governamentais sobre evacuações da população que, se tomadas equivocadamente, na melhor das hipóteses serão custosas financeiramente e, na pior, se converterão em perdas e óbitos. O sensoriamento remoto tem sido cada vez mais importante

para este monitoramento, já que, além de fornecer resultados precisos, permite investigar vulcões a distância, garantindo maiores níveis de segurança e maior acessibilidade ao se tratar de áreas vulcânicas ativas consideradas inacessíveis.

2. OBJETIVOS

Este estudo delimita áreas mais suscetíveis a danos por movimentos de massa do vulcão Nevado del Ruiz. O último mapa de riscos de ameaças deste vulcão data de 2015, sendo necessária sua atualização, dada sua importância para tomada de decisões como evacuação de locais a serem potencialmente atingidos. Para tanto, foram utilizados dados geológicos somados a técnicas de sensoriamento remoto, visando a análise das condições da superfície terrestre do edifício vulcânico e do terreno ao seu redor.

3. TERMINOLOGIAS IMPORTANTES

Para plena compreensão do trabalho é necessário apresentar algumas definições essenciais ligadas à redução de riscos de desastres. Para isso, terminologias foram retiradas da Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (UNDRR, 2016¹):

- Perigo: processos que podem causar grande impacto social, econômico ou ambiental, suas origens são naturais ou antropogênicas e são caracterizados por sua localização, intensidade, frequência e probabilidade de ocorrência. São exemplos: terremotos, atividades vulcânicas, tsunamis, movimentos de massa, deslizamentos de terra e rocha, fluxos de detritos, entre outros.
- Exposição: se refere às condições de indivíduos e infraestruturas em locais sujeitos a riscos, podem ser quantificadas pela quantidade dos mesmos presentes em determinadas áreas.
- Vulnerabilidade: relacionada à susceptibilidade de comunidades e sistemas aos impactos de perigos, dependendo de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais.
- Desastre: perturbação na sociedade causada por eventos perigosos que interagem com condições de exposição e situação de vulnerabilidade. Podem ocorrer de forma frequente, com início súbito ou de forma gradual, além de alcançar escalas variadas, até em nível internacional. Os impactos causados por desastres é o saldo total, incluindo os pontos negativos e positivos de um evento.
- Resiliência: se refere à relação entre a sociedade e os perigos, dependendo da capacidade da sociedade de lidar, se adaptar e recuperar dos impactos de perigos de forma eficiente.

¹ Disponível em: <https://www.unrr.org/drr-glossary/terminology#R>. Acesso em: 10/12/2024.

- Avaliação dos riscos de desastres: determinação do tipo e extensão dos riscos de desastres, onde são analisadas as interações entre os perigos potenciais, as condições de exposição, situação de vulnerabilidade e resiliência da sociedade.

Assim, o presente trabalho é focado na avaliação de perigos do vulcão Nevado del Ruiz, etapa primária e essencial para o mapeamento de risco de desastres associado ao mesmo. Para que, futuramente, com o refinamento de dados de perigos vulcânicos, possam ser adicionadas as etapas de análise de exposição, vulnerabilidade e resiliência, que de forma conjunta formam a avaliação de riscos de desastres.

4. GEOLOGIA REGIONAL

O vulcanismo na Colômbia é causado pela subducção oblíqua da Placa de Nazca (oceânica) sob a Placa Sul-Americana (continental), gerando assim um arco magmático. O cenário tectônico no local se torna mais complexo devido a influências das tensões da Placa do Caribe e da microplaca de Coiba (Toro e Osorio, 2005). Em relação ao arco, os vulcões colombianos pertencem a Zona Vulcânica Norte, com o Complexo Vulcânico Nevado del Ruiz inserido na área de vulcanismo da Zona de Cerro Bravo - Cerro Machín (Bohórquez et al., 2005).

A interação entre as placas litosféricas gera sistemas de falhas como produto, além de reativar sistemas de falhas pré-existentes (Mejía Toro, 2012). O vulcão Nevado del Ruiz se encontra em meio a estes sistemas de falhas regionais, os quais influenciam a canalização e ascensão de magma por meio da criação de redes de fraturas, além de controlar a circulação de fluidos hidrotermais presentes no edifício. Os sistemas mais relevantes são a Falha Villamaría-Termiales de direção NW-SE, a mais ativa durante estágios passados da atividade vulcânica do Nevado del Ruiz (Borrero et al., 2009), e a Falha da Palestina de direção NE-SW, considerada atualmente a principal para canalização de magma (Londoño e Kumagai, 2018). Há ainda outras falhas atuantes na região, como a Nereidas, Santa Rosa e Rio Claro (Fig. 2).

O embasamento da área é constituído por rochas metamórficas triássicas do Complexo Cajamarca, com membros pelíticos compostos por xistos, filitos e metassedimentos, membros máficos de xisto verde e anfibolitos, membros silicosos com quartzitos e quartzo-xisto e um membro composto por calcário, com mármore e calcita-xisto. Também estão presentes corpos ígneos intrusivos datados do Paleoceno ao Eoceno, como o Batólito El Bosque e o Estoque Manizales, de composições granodiorítica-tonalítica e quartzo diorítico-tonalítico, respectivamente. Sedimentos vulcanoclásticos sem fonte definida também aparecem na região, atribuídos a Formação Manizales e Formação Casabianca, de idades variando do Mioceno ao Pleistoceno (Ceballos-Hernández et al., 2020; González-Garcia e Jessell, 2016).

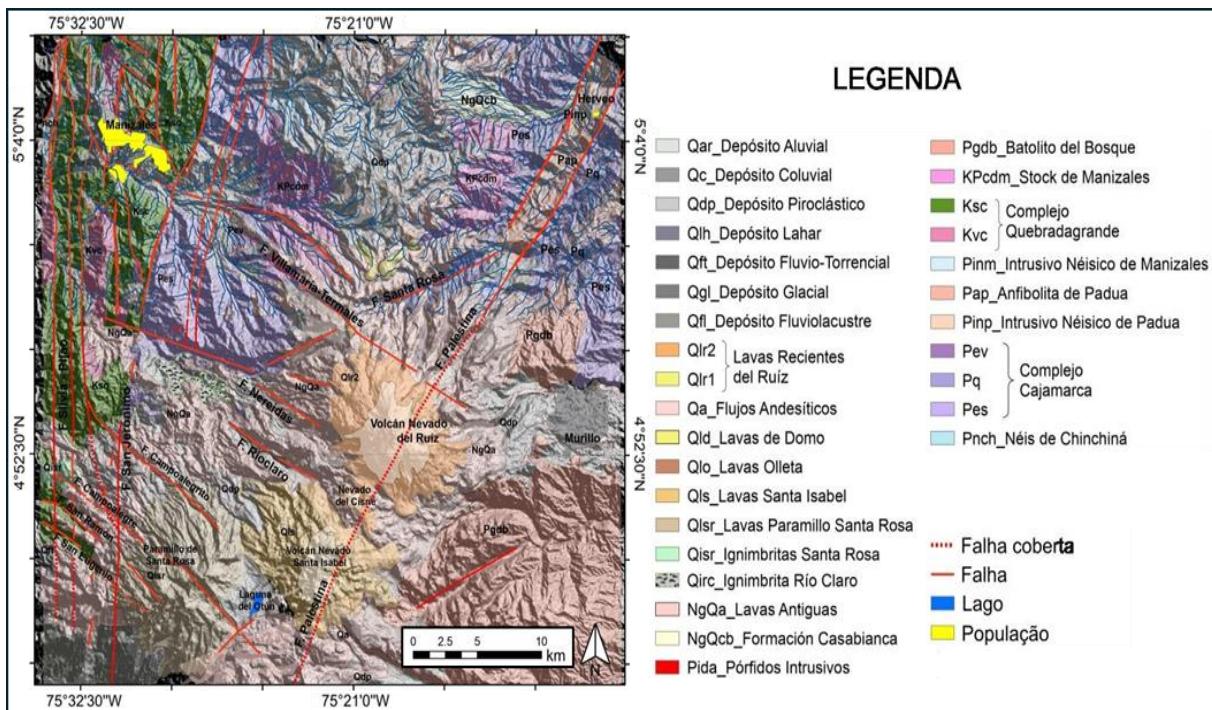


Figura 2. Mapa geológico e estrutural da região do Nevado del Ruiz, com destaque para as falhas geológicas existentes (extraído de Mejía Toro, 2012).

5. CARACTERÍSTICAS DO VULCÃO NEVADO DEL RUIZ

O estratovulcão Nevado del Ruiz tem seu cone formado a partir da alternância entre rochas piroclásticas e fluxos de lava, atingindo 5.321 metros de altitude. Seu flanco apresenta dois cones parasitas inativos, La Olleta, a oeste, e La Piraña, a leste; na porção norte de seu cume está localizada a cratera ativa Arenas, variando de 870 a 980 metros de diâmetro e 300 metros de profundidade (Ordonez et al., 2022; Anexo 1).

Diversos estudos geofísicos foram realizados para avaliar a atividade em subsuperfície e modelar a câmara magmática do Nevado del Ruiz (Muñoz et al., 1990; Londoño e Sudo, 2001; Londoño e Sudo, 2003; González-Garcia et al., 2015; Lundgren et al., 2015; Vargas et al., 2017; Cervantes, 2019; Aguilera et al., 2020), permitindo estimar o posicionamento de reservatórios magmáticos e trajetos de ascensão de magma durante períodos de erupção. Vários reservatórios magmáticos podem estar ligados ao Nevado del Ruiz, com o maior deles a cerca 2 quilômetros de profundidade na direção oeste da cratera, relacionado ao sistema de falhas da Palestina (Londoño e Kumagai, 2018; Fig. 3).

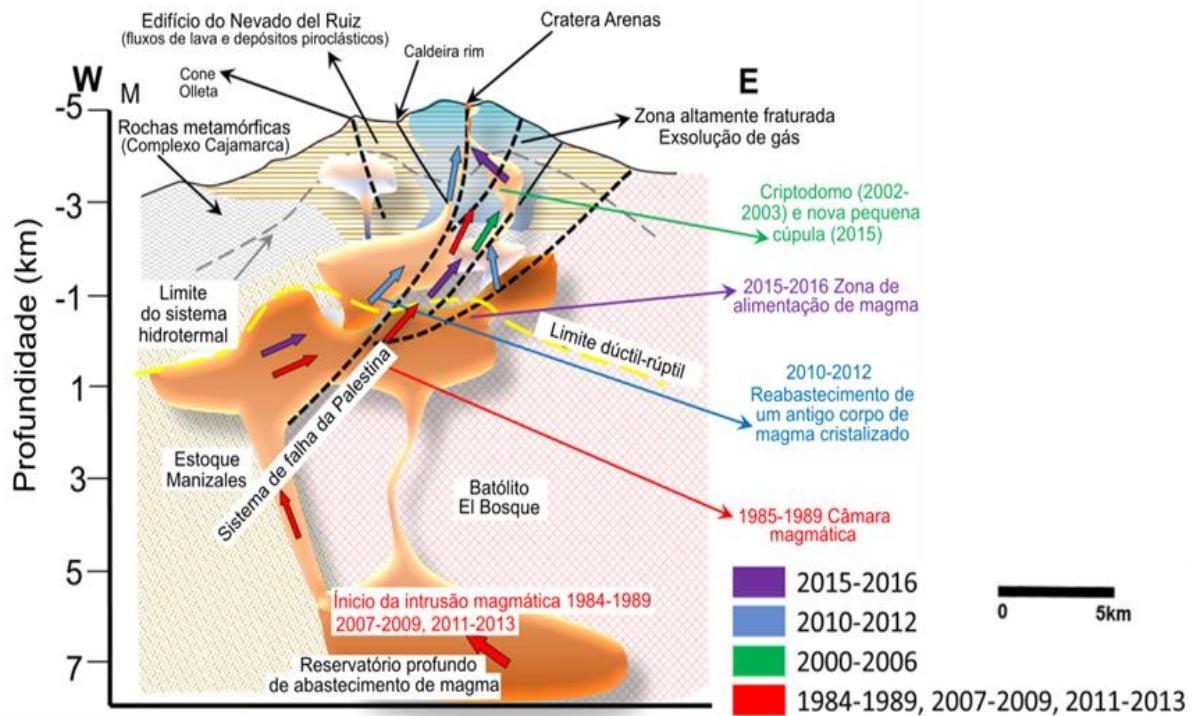


Figura 3. Modelo de câmara magmática do vulcão Nevado del Ruiz com posicionamento de reservatórios e trajetos de ascensão de magma em diferentes datas de atividade (extraído de Londoño e Kumagai, 2018).

Uma calota de gelo de aproximadamente 8.000.000 m² recobre o vulcão de forma heterogênea (IDEAM, 2021), com ausências de gelo espalhadas pela porção noroeste do cone. Apesar de sua espessura média ser de cerca de 47 metros (Ceballos et al., 2006), variações morfológicas caracterizadas por áreas mais planas e outras mais íngremes, refletem em áreas com espessuras de 30 até 190 metros (Thouret et al., 2007). A calota ainda apresenta dimensões significativas mesmo após diminuir sensivelmente durante a erupção de 1985 e por efeitos climáticos (Fig. 4; Tabela 1; Anexo 2).



Figura 4. Imagem de satélite do vulcão Nevado del Ruiz, com destaque a cratera Arenas e a área de glaciar em seu cume, em setembro de 2019 (extraído de Smithsonian Institution, 2019²).

² Global Volcanism Program, 2019. Report on Nevado del Ruiz (Colombia) (Krippner, J.B., and Venzke, E., eds.). Bulletin of the Global Volcanism Network, 44:12. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201912-351020>

Tabela 1. Dados da evolução da área do glaciar do vulcão Nevado del Ruiz (modificado de IDEAM, 2021³).

Ano	Área do Glaciar (Km ²)	Ano	Área do Glaciar (Km ²)
± 1850	47.5	2016	9.3
50's	21.0	2017	8.88
80's	17.9	2019	8.39
90's	12.9	2020	8.14
2010	10.3		

A geleira presente no edifício vulcânico do Nevado del Ruiz age como nascente de vários rios. Para leste, fluem os rios Guali, Azufrado, Lagunillas e Recio, que desaguam no Rio Magdalena; já no sentido oeste correm os rios Molinos e Nereidas que posteriormente dão origem aos rios Claro e Chinchiná, que são afluentes do Rio Cauca (Anexo 3). Estes cursos d'água percorrem grandes extensões, sendo importantes para a população local, ainda que possa ser impactada pela variação de vazão dos mesmos.

5.1. Períodos Eruptivos

Erupções vulcânicas podem ser subdivididas a partir da duração de sua atividade (Fisher e Schmincke, 1984). Períodos eruptivos variam de milhares a milhões de anos, épocas eruptivas de dezenas a milhares de anos, fases eruptivas se estendem de minutos a dias (onde diferentes fases compõem as erupções vulcânicas) e pulsos eruptivos duram segundos a minutos. A partir disso, a atividade do Nevado del Ruiz é separada em quatro períodos: Present Ruiz, Older Ruiz, Ancestral Ruiz e Pre-Ruiz Lavas (Tabela 2).

Tabela 2. Modelo estratigráfico do Nevado del Ruiz relacionando idades dos períodos eruptivos com eventos de fases construtiva e destrutiva do edifício vulcânico, nome dos períodos é mantido em inglês conforme utilizado internacionalmente (extraído de Borrero et al., 2009).

MODELO ESTRATIGRÁFICO DO NEVADO DEL RUIZ		
(Idades de Thouret et al., 1990; Lesinsky, 1990; Young, 1991 e Schaefer, 1995)		
PRESENT RUIZ (0.15 Ma - Presente)	TEFRAS RECENTES E HISTÓRICOS FLUXOS PIROCLÁSTICOS RIO MOLINOS FASE DESTRUTIVA (FLUXOS PIROCLÁSTICOS) LAVAS E CÚPULAS CONE PARASITA LA OLLETA, LAVAS CONE PARASITA LA PIRÁNA, LAVAS E PIROCLASTOS FASE CONSTRUTIVA (FLUXOS DE LAVA)	3.100 A.P. 10.520 - 600 A.P. 0.1 Ma - 13.000 A.P.
OLDER RUIZ (0.8 - 0.2 Ma)	IGNIMBRITO RIO CLARO FASE DESTRUTIVA LAVAS EL CISNE CONES DE LAVAS INICIAIS LAVAS SANTA ISABEL FASE CONSTRUTIVA (FLUXOS DE LAVA)	0.089 ± 0.007 Ma 0.2 - 0.16 Ma 0.4 ± 0.1 Ma 0.76 ± 0.05 Ma 0.76 - 0.2 Ma
ANCESTRAL RUIZ (1.8 - 0.8 Ma)	FASE DESTRUTIVA FASE CONSTRUTIVA (FLUXOS DE LAVA E CÚPULAS)	0.97 - 0.76 Ma 1.8 - 0.97 Ma
PRE-RUIZ LAVAS (1.8 ± 0.1 Ma)	EMBASAMENTO VULCANOCLÁSTICO : FASE DESTRUTIVA	> 1.5 Ma
Siglas: Ma= Milhões de anos		
A.P.= Antes do presente (ano de 1950 como referência)		

³ Disponível em: <https://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>. Acesso em: 29/04/2024.

6. FATORES CLIMÁTICOS

A Colômbia apresenta condições climáticas variadas ao longo de sua extensão, sendo afetada por fatores como a Zona de Convergência Intertropical e variações topográficas devido a Cordilheira dos Andes. Assim, a região andina do país, apresenta regime bimodal de precipitação anualmente, os trimestres março-abril-maio e setembro-outubro-novembro compõe a estação chuvosa, caracterizada por altos índices de precipitação, enquanto os trimestres de baixa precipitação são junho-julho-agosto e dezembro-janeiro-fevereiro (Orozco e Escobar 2008).

A partir de modelagens climáticas do ano de 2023 (Fig. 5), o regime bimodal de precipitação anual atua na região do vulcão Nevado del Ruiz enquanto as temperaturas médias se mantêm constantes ao longo do ano, assim como a umidade relativa. Os ventos que atingem seu edifício vulcânico se concentram nas direções nordeste, leste e sudeste com velocidade média de 5 Km/h.

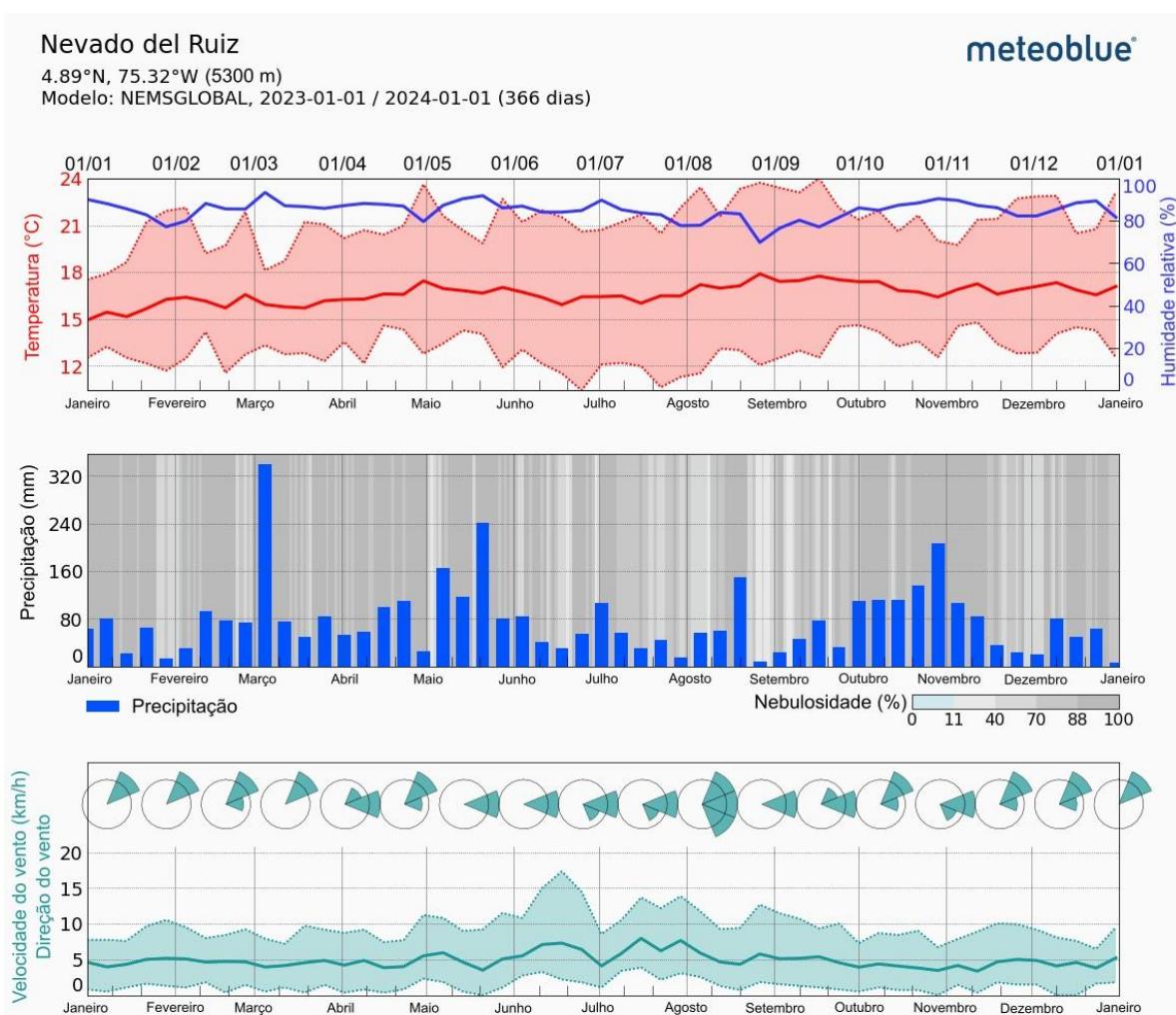


Figura 5. Modelagem climática com temperatura, precipitação e direção e velocidade dos ventos, para o ano de 2023 (extraído de Meteoblue, 2024⁴).

⁴ Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/weatherarchive/nevado-del-ruiz_col%C3%B4mbia_3670563. Acesso em: 23/06/2024.

Além de variações climáticas ao longo de um ano, os fenômenos climáticos El Niño e La Niña afetam a hidroclimatologia da Colômbia durante os anos de atuação de cada, modificando a extensão de geleiras tropicais. Desta forma, a área de calota do Nevado del Ruiz sofre recuos glaciais durante o El Niño e há recuperação de massa em períodos de La Niña (Pérez et al., 2019). Desde 1979 até 2023 também há mudanças em fatores que podem ser atribuídos ao aquecimento global (Fig. 6), com aumento de temperaturas médias em conjunto com diminuição de pluviosidade da área.

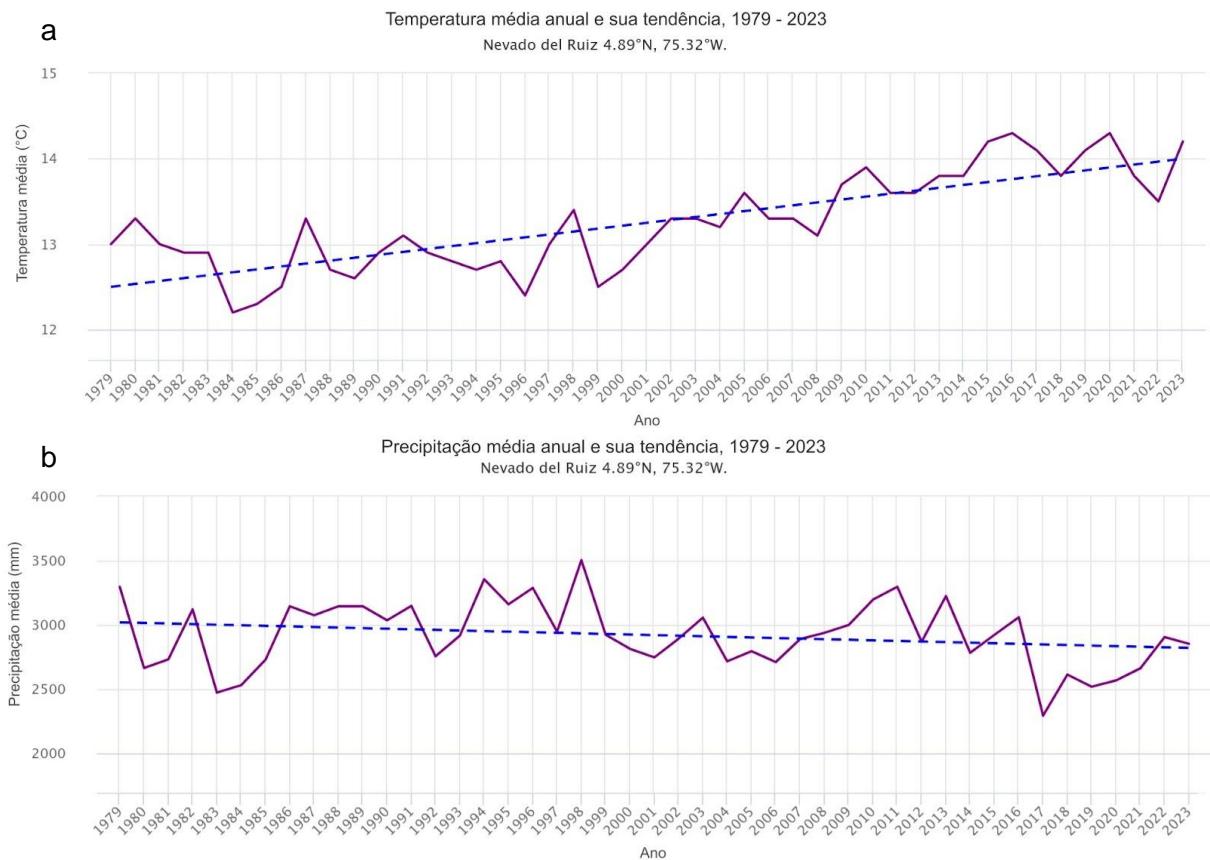


Figura 6. Gráficos de (a) temperatura e (b) precipitação média anual e suas tendências, de 1979 até 2023 (extraído de Meteoblue, 2024⁵)

7. PERIGOS VULCÂNICOS

7.1. Lahar

Lahars são constituídos por uma mistura multifásica de água e sedimentos gerados repentinamente em edifícios vulcânicos (Fagents et al., 2013; Parfitt e Wilson, 2009). Esta mistura, num evento de colapso de seu reservatório, pode atingir dezenas de quilômetros por hora, incorporando massas externas ao seu fluxo original. Sua velocidade e capacidade de

⁵ Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/climate-change/nevado-del-ruiz_col%C3%B4mbia_3670563. Acesso em: 23/06/2024.

incorporação de matéria podem transportar grandes volumes de sedimentos, fluídos e detritos para distâncias de até mais de uma centena de quilômetros de sua origem (Fagents et al., 2013; Fig. 7).

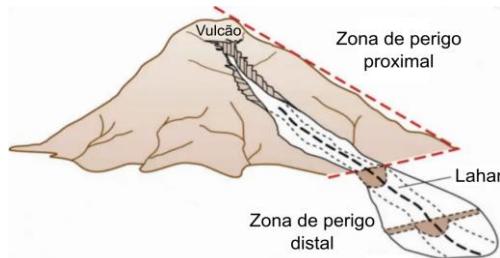


Figura 7. Esquema de escoamento de lahar (extraído de Earth How, 2023⁶).

Lahars são gerados em ambientes que apresentam uma grande variação de altitude, abundância de sedimentos inconsolidados e uma fonte de água. Para que o processo seja desencadeado, é necessário um mecanismo de estopim, como o derretimento de neve devido a troca de calor com produtos vulcânicos em altas temperaturas, rompimento de corpos hídricos represados e até mesmo pelo escoamento de água meteórica (Fagents et al., 2013). A depender de seus eventos geradores, a temperatura do lahar pode variar, havendo lahars frios, sem associação com atividades vulcânicas, e lahars quentes, relacionados a erupções, onde a temperatura máxima pode alcançar 100°C (National Park Service, 2023⁷).

A propagação de lahars ocorre por ação gravitacional, com o fluxo acompanhando a topografia para regiões de menor altitude (Bachri et al., 2019). Desta forma, estes fenômenos tendem a acompanhar o trajeto de redes de drenagem enquanto fluem com grande energia. Ao percorrer trechos mais íngremes da superfície o processo de erosão é intensificado, de forma que mais material é incorporado e transportado junto ao fluxo. Quando alcança áreas mais planas, o fluxo deixa de ser confinado, espalhando e depositando o material erodido e alterando drasticamente a paisagem (Fig. 8).

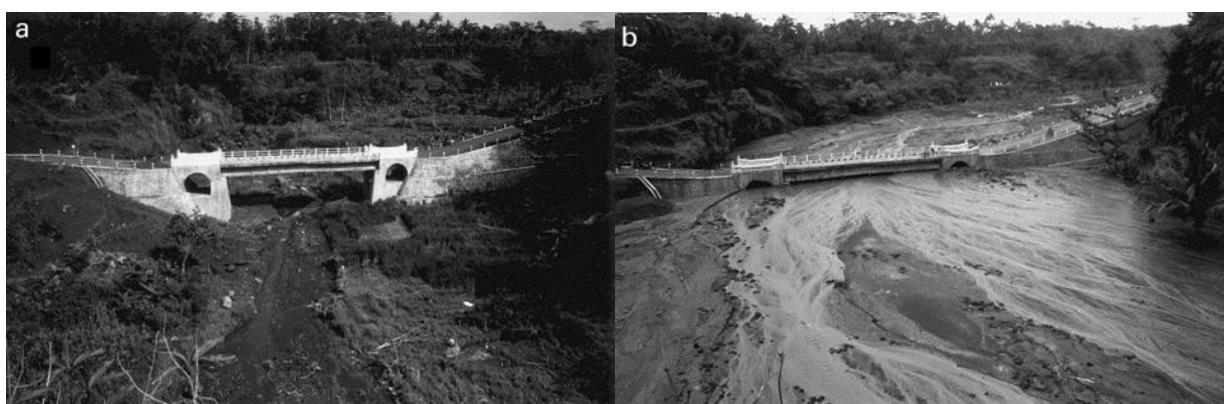


Figura 8. Ponte sobre o rio Boyong próximo ao vulcão Merapi, 7 m acima do vale, Indonésia. (a) Foto de dezembro de 1994. (b) Foto de fevereiro de 1995, após passagem de lahar (extraído de Lavigne et al., 2000).

⁶ Disponível em: <https://earthhow.com/lahar/>. Acesso em: 01/02/2024.

⁷ Disponível em: <https://www.nps.gov/articles/000/volcanic-processes-lahars.htm>. Acesso em: 10/12/2024.

Segundo Fagents et al. (2013), lahars podem ser classificados de duas formas com base na quantidade de sedimentos incorporados pelo fluxo. Quando o volume de sedimentos varia de 20% a 50%, recebe o nome de fluxo hiperconcentrado; enquanto ao alcançar o intervalo de 50% a 80%, passa a ser chamado de fluxo de detritos. As variações na concentração de sedimentos e água no sistema definem o seu comportamento e modo de deposição, já que apresentam influência direta nos processos internos ao fluxo. A forma de propagação destes fluxos ainda pode ser influenciada pela parcela de partículas da granulometria argila que, se superiores a 5%, costumam ser mais móveis e resistentes a transformações que os fluxos de menores concentrações.

Desta forma, devido a suas altas mobilidades, lahars podem alcançar rapidamente centros populacionais inseridos nos vales, justamente onde o fluxo deixa de ser confinado e sofre maior espalhamento, causando grandes danos materiais e perda de vidas, como ocorrido durante a erupção do Nevado del Ruiz em 1985 (Barberi et al., 1990; Hall, 1990; Hall, 1992; Scarpa et al., 1996; Voight, 1990).

7.2. Avalanches de Detritos Vulcânicos

Avalanches de Detritos Vulcânicos são processos comuns em vulcões (Siebert e Roverato, 2021), sendo caracterizadas por desmoronamentos ou deslizamentos de partes de seu edifício, podendo ocorrer colapso total ou parcial dos flancos e causando depressões de forma semicircular na paisagem (Ioan et al., 2023; Fig. 9). No processo são mobilizados volumes de até dezenas de quilômetros cúbicos de material dos flancos (Makris et al., 2023), na forma de blocos maciços e material fino fragmentado, onde, impulsionados pela gravidade, podem percorrer distâncias de dezenas de quilômetros.



Figura 9. (A) Avalanche de detritos do vulcão Almolonga em 1993, Guatemala, formando depósitos que se estendem até 800 metros de distância da fonte (extraído de Smithsonian Institution, 2024⁸). (B) Depressão de forma semicircular (marcada por pontilhado branco) formada durante colapso que produziu enorme avalanche de detritos no vulcão Reventador, Equador, em março de 2005 (Smithsonian Institution, 2024⁹).

⁸ Disponível em: <https://volcano.si.edu/gallery>ShowImage.cfm?photo=GVP-08426>. Acesso em: 03/05/2024.

⁹ Disponível em: <https://volcano.si.edu/gallery>ShowImage.cfm?photo=GVP-11671>. Acesso em: 03/05/2024.

De forma geral, estratovulcões tendem a ser instáveis e sujeitos a processos de perda de massa devido a sua grande altitude, inclinação e rápido crescimento a partir da intercalação de materiais reológicos distintos, afetando a forma como o material se comporta diante de deformações (USGS, 2024¹⁰). Diversos fatores geram instabilidade nos edifícios, como presença de falhas regionais que cortam o vulcão, atividade sísmica vulcânico-tectônica, intrusão de diques, inflação e deflação da câmara magmática, desestabilização de taludes, alteração hidrotermal, infiltração meteórica de água e processos erosivos (Hürlimann et al., 2000; Hughes et al., 2020). O acúmulo de fatores de instabilidade causa enfraquecimento progressivo no edifício, sendo necessário um mecanismo desencadeante que cause a perda de resistência na base da massa rochosa para dar início a avalanche de detritos (de Vries e Davies, 2015), podendo ocorrer intrusão magmática, erupções vulcânicas, alterações no hidrotermalismo, atividade sísmica, descargas glaciais ou chuvas intensas (Grosse et al., 2022).

Vulcões com calotas de gelo requerem atenção especial, apresentando risco ainda maior de desestabilização e rupturas de taludes, já que o glaciar atua como um reservatório de água para reações de alteração das rochas e seus processos de erosão glacial expõe áreas mais profundas do edifício sujeitas a alteração (Carrasco-Núñez et al., 1993).

As avalanches de detritos por si só causam riscos a populações instaladas nas proximidades de vulcões devido aos altos volumes mobilizados, porém, dependendo de sua magnitude, perigos adicionais podem ocorrer, já que colapsos de grande porte de flancos podem causar alterações de pressão no sistema, onde há possibilidade de ocorrência de erupções, inclusive explosões laterais dirigidas. Além disso, podem causar modificações no sistema de canalização magmática e nos sistemas de drenagem da região.

7.3. Correntes de Densidade Piroclástica

Correntes de densidade piroclástica são fluidos multifásicos que descem as encostas de um vulcão por meio da gravidade. São constituídas por uma mistura de gás e partículas piroclásticas em alta temperatura, podendo alcançar até 800°C e velocidades de até 720 Km/h (200 m/s; Fagents et al., 2013). As correntes variam de acordo com os elementos presentes, sendo classificadas como fluxos, quando seu material constituinte é mais denso, e como ondas, se forem mais diluídos. Esta mudança de dinâmica ocorre no interior das correntes de densidade piroclásticas, já que o comportamento das partículas não se mantém constante, sendo sua parte basal mais densa por maior concentração de massa, enquanto a região superior fica mais diluída, com maior quantidade de cinzas (Fagents et al., 2013; Fig. 10).

A formação de fluxos piroclásticos é comum em erupções vulcânicas explosivas e pode ser gerado de diferentes formas: a partir de colapsos gravitacionais de colunas eruptivas

¹⁰ Disponível em: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/landslides-are-common-tall-steep-and-weak-volcanic-cones>. Acesso em: 03/05/2024.

ou de domos de lava, pela rápida descompressão de um corpo magmático, ou por explosões laterais dirigidas de edifícios vulcânicos (Fagents et al., 2013; Parfitt e Wilson, 2009; Fig. 10). As correntes de densidade piroclásticas são geradas por uma diferença de densidade entre o material vulcânico expelido por um destes eventos e o ar atmosférico ao seu redor, sendo este último menos denso. Desta forma, o fluido irá se mover horizontalmente através da gravidade para zonas de menor densidade.

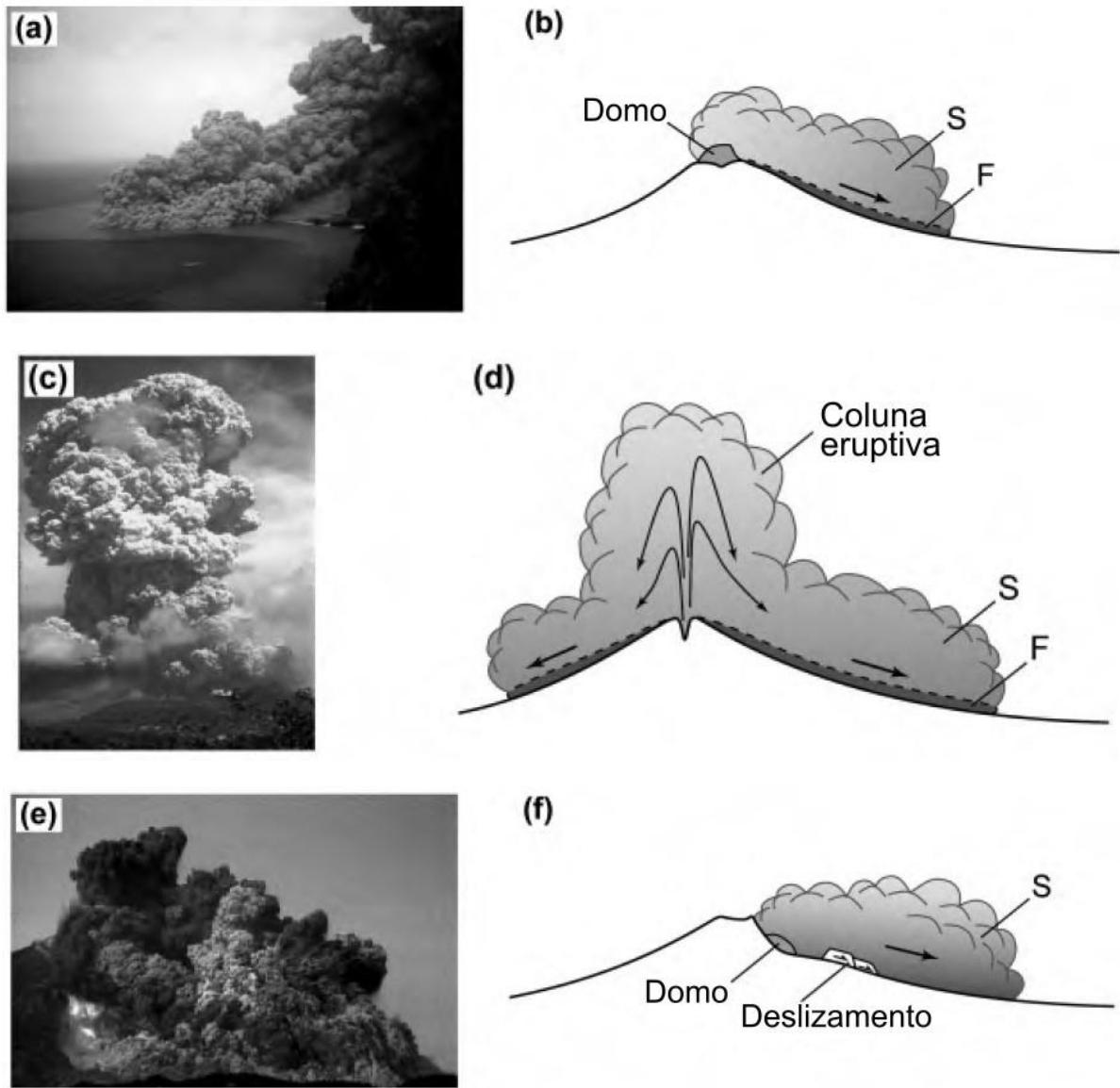


Figura 10. Mecanismos de geração de correntes de densidade piroclástica, em que **S** representa o membro superior diluído e **F** o membro basal denso. (a) Colapso de domo de lava, Montserrat, 1997; (b) Esquema de colapso gravitacional ou explosivo de domo de lava; (c) Colapso de coluna eruptiva, Montserrat, 1997; (d) Esquema de colapso gravitacional de coluna eruptiva; (e) Explosão lateral dirigida, Monte St Helens, 1980; (f) Esquema de explosão lateral após descompressão de criptodomo causado por deslizamento (extraído de Fagents et al., 2013).

A topografia de um vulcão e de seus arredores causa influência na propagação das correntes de densidade piroclástica de acordo com sua concentração, fluxos densos podem ser confinados ou dirigidos para certas áreas, tendo depósitos concentrados em baixos topográficos com espessura variando de metros a dezenas de metros e sendo ausentes ou

pouco espessos em altos topográficos (Dufek et al., 2015). Ao contrário dos fluxos densos, as ondas diluídas podem alcançar e sofrer deposição em altos topográficos, tendo menos influência da topografia (Fagents et al., 2013).

Este processo por si só é muito perigoso devido às altas temperaturas, tendo grande capacidade destrutiva em cidades ao longo da história, como em Pompéia (Itália) durante a erupção do Monte Vesúvio, em 79 DC, e Saint-Pierre (Ilha da Martinica-Caribe) pela erupção do Monte Pelée, em 1902. Além disso, em consequência da grande quantidade de calor liberado das correntes de densidade piroclástica, um perigo ainda maior pode ser desencadeado em edifícios vulcânicos cobertos por calotas de gelo, já que partes da calota podem sofrer rápido derretimento, gerando fluxos muito móveis, os lahars.

7.4. Derrames de Lava

Fluxos (ou derrames) de lava são formados pelo escoamento de magma ainda coeso extravasado do interior de um vulcão, seu comportamento é variado em função do tipo de magma expelido, sendo condicionado por sua composição química, temperatura, viscosidade e teor de gás (Tabela 3). Além das características próprias de cada magma, os derrames também dependem de sua taxa de efusão, declividade do terreno em que há escoamento e pelo volume de material expelido, cujo fluxo pode ter seu avanço cessado devido à falta de suprimento de magma. Porém, mesmo que a fonte de magma tenha continuidade, o resfriamento da lava também tem a capacidade de parar seu fluxo principalmente em sua frente de avanço, já que ocorre perda de calor da lava para o ambiente ao seu redor (solo e ar), impedindo a movimentação do material (Fagents et al., 2013; Parfitt e Wilson, 2009).

Tabela 3. Características dos magmas basáltico, andesítico e riolítico, incluindo composição química, temperatura, viscosidade e teor de gás (extraído de Tulane University, 2015¹¹).

Magma	Composição química	Temperatura	Viscosidade	Teor de gás
Basáltico (máfico)	45 - 55 SiO ₂ % Alto em Fe, Mg, Ca Baixo em K, Na	1000-1200°C	Baixa	Baixo
Andesítico	55 - 65 SiO ₂ % Intermediário em Fe, Mg, Ca, Na, K	800-1000°C	Intermediária	Intermediário
Riolítico (félscico)	65 - 75 SiO ₂ % Baixo em Fe, Mg, Ca Alto em K, Na	650-800°C	Alta	Alto

Magmas de composição máfica apresentam comportamento mais fluido devido à baixa viscosidade (baixo conteúdo de SiO₄) e teor de gases. Quando transbordam de uma abertura vulcânica, lavas máficas percorrem o terreno para áreas de menor altitude, por meio da gravidade, gerando depósitos de maior comprimento e menor espessura, associados a

¹¹ Disponível em: https://www2.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/volcan&magma.htm. Acesso em: 02/10/2024.

formação de vulcões do tipo escudo. Além de seu transbordamento, magmas máficos podem ser projetados de crateras como coágulos de magma, onde, ao atingirem o solo com baixa temperatura, os coágulos se acumulam sem formação de fluxo, porém, se alcançarem o solo com temperatura suficientemente alta para ocorrer fusão entre os coágulos, também pode ocorrer movimentação (Parfitt e Wilson, 2009). Magmas de composição felsica, relacionados ao crescimento de estratovulcões, são altamente viscosos (alta SiO₄) e apresentam alto teor de gases, comumente sendo ejetado durante erupções explosivas e apresentando estado mais sólido. Devido a sua alta viscosidade, sua movimentação ocorre de forma lenta, não fluindo com facilidade pelo terreno, formando estruturas em formatos de blocos e gerando depósitos de menor comprimento e maior espessura (Fig. 11).

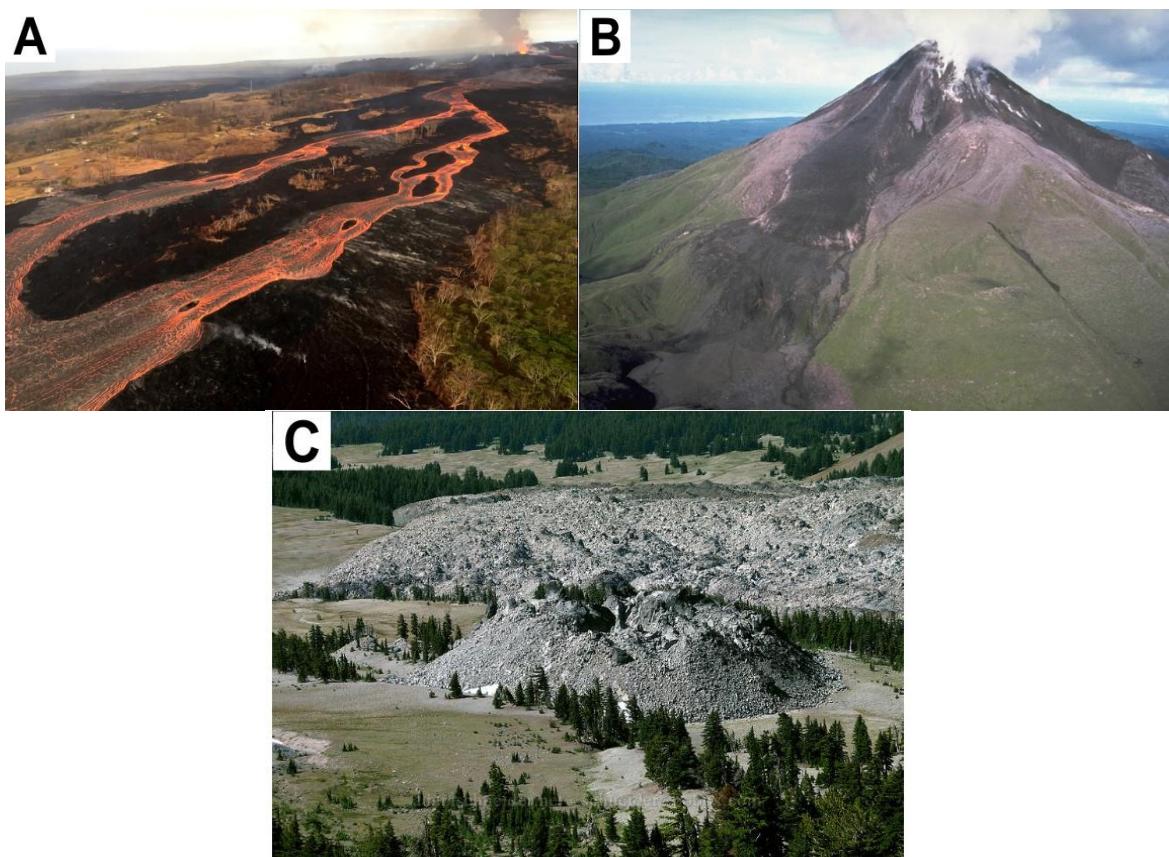


Figura 11. Comparação entre magmas de diferentes composições. (A) Fluxo de lava basáltica no Havaí, 2018 (extraído de National Park Service, 2023¹²). (B) Fluxo de lava andesítica no vulcão Bagana, Papua Nova-Guiné, 1988 (extraído de Smithsonian Institution, 2024¹³). (C) Fluxo de lava riolítico na Irmã do Sul (South Sister Trail, Three Sisters Wilderness), Oregon-EUA, 2007 (extraído de Adam Schneider's digital photos, 2007¹⁴).

Quando comparada a outros perigos vulcânicos, a mortalidade relacionada a derrames de lava é muito menor, com maior risco em casos de lavas máficas, em que os fluxos alcançam centros populacionais com maior velocidade. Derrames basálticos do vulcão Kilauea (Havaí) são bem conhecidos por tomarem regiões habitadas da ilha, sendo possível

¹² Disponível em: <https://www.nps.gov/subjects/volcanoes/lava-flows.htm>. Acesso em: 02/10/2024.

¹³ Disponível em: <https://volcano.si.edu/gallery>ShowImage.cfm?photo=GVP-00500>. Acesso em: 02/10/2024.

¹⁴ Disponível em: <https://adamschneider.net/photos/2007-08-ss/?p=20070809-103712>. Acesso em: 02/10/2024.

realizar a evacuação da população com antecedência. No entanto, fluxos de lava de outros vulcões, como o Nyiragongo (República Democrática do Congo) em 1977 e 2002 atingiram velocidades de dezenas de quilômetros por hora, causando fatalidades em cidades próximas.

7.5. Cinzas Vulcânicas

Cinzas vulcânicas alcançam tamanhos de até 2 mm, sendo formadas durante erupções vulcânicas de caráter explosivo, onde além de gases, materiais magmáticos e rochas dos condutos são ejetados de forma fragmentada, dando origem a plumas vulcânicas. Estas plumas podem atingir dezenas de quilômetros de altura e, quando transportados pelo vento, se dispersam em até milhares de quilômetros de distância (Fig. 12; Fagents et al., 2013).



Figura 12. (A) Trajeto de cinzas pela atmosfera do vulcão Shiveluch, na Península de Kamchatka, Rússia, em 2012, visível por imagens de satélite (extraído de business Insider, 2012¹⁵). (B) Deposição de cinzas em edifícios e terrenos na ilha de La Palma, Ilhas Canárias, causada pelo vulcão Cumbre Vieja, em 2021 (extraído de Prensa Latina, 2021¹⁶).

A coluna eruptiva pode ser dividida em três regiões principais, a região de empuxo de gás, onde há rápido fluxo ascendente do material liberado (mais denso) no ar atmosférico (menos denso). A região convectiva, em que o material liberado e o ar atmosférico sofrem mistura e o fluxo da pluma continua pela diferença de densidade e a região guarda-chuva, na qual a pluma e o ar atmosférico entram em equilíbrio de flutuabilidade e os materiais ali presentes são disseminados pelo vento. Assim, a partir das regiões nas quais as partículas de cinzas estão, elas se comportam de forma diferente em relação à trajetória de deslocamento e deposição (Fig. 13; Parfitt e Wilson, 2009).

¹⁵ Disponível em: <https://www.businessinsider.com/volcanic-ash-cloud-visible-from-space-2012-10>. Acesso em: 02/10/2024.

¹⁶ Disponível em: <https://www.prensalatina.com.br/2021/10/27/pesadelo-de-cinzas-vulcanicas-calvario-em-la-palma-ilhas-canarias/>. Acesso em: 02/10/2024.

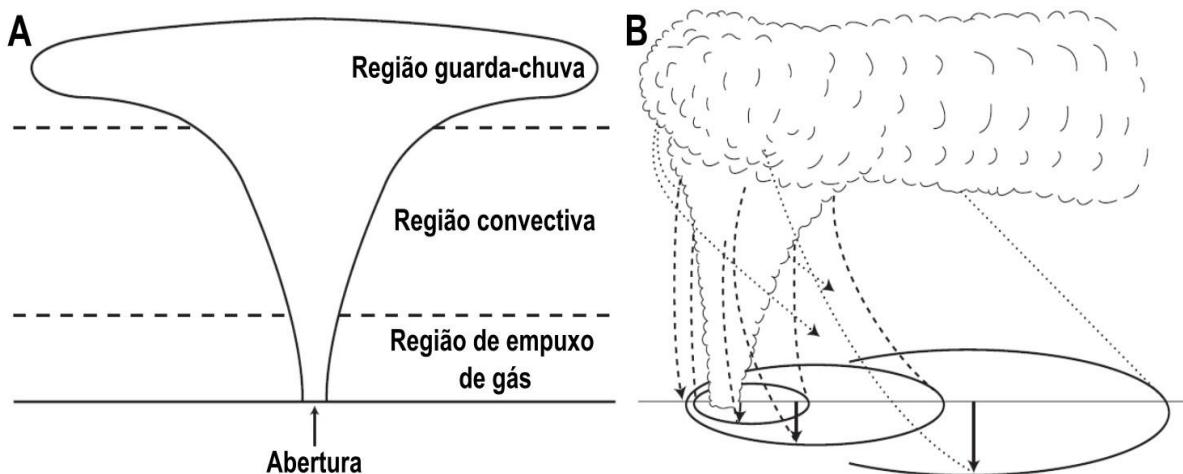


Figura 13. (A) Coluna eruptiva, com destaque para suas regiões principais, região de empuxo de gás, região convectiva e região guarda-chuva. (B) Relação entre região da coluna eruptiva e áreas de dispersão e deposição de cinzas (extraído de Parfitt e Wilson, 2009).

Além das condições eruptivas, propriedades atmosféricas atuantes nos locais de erupção são essenciais no controle de dispersão das cinzas, principalmente pela direção e velocidade dos ventos. O material disperso e depositado apresenta grande relação com o tamanho do material ejetado, quanto menores eles forem, maiores alturas na coluna serão atingidas, alcançando a região guarda-chuva, sendo a que mais sofre dispersão na atmosfera e apresenta áreas de deposição mais distantes. Já os materiais de maior tamanho alcançam alturas menores, na região de empuxo de gás, ocorrendo deposição próxima da cratera, enquanto isso, a região convectiva é intermediária entre eles (Fig. 13; Parfitt e Wilson, 2009).

A presença de cinzas na atmosfera pode causar danos diretos a seres vivos devido a sua inalação e composição, além de danos indiretos causados pelo seu espesso acúmulo em edifícios e plantações, prejudicando a infraestrutura e economia local (Fig. 12). Dentre estes, a aviação é o setor mais prejudicado, impedindo que voos ocorram em áreas afetadas por cinzas por risco de acidentes. A erupção de 2010 do vulcão Eyjafjallajökull (Islândia) é um dos eventos mais famosos devido a necessidade de interrupção do tráfego aéreo internacional na região norte e central da Europa.

8. ÍNDICES DE EXPLOSIVIDADE VULCÂNICA

O Índice de Explosividade Vulcânica (Volcanic Explosivity Index) ou VEI é uma escala logarítmica de magnitude de erupções vulcânicas, que leva em consideração seu impacto, de acordo, principalmente com o volume total de material ejetado e a altura da coluna eruptiva (Fig. 14). Sua criação teve o objetivo de ser uma maneira simples de classificar a magnitude das erupções vulcânicas, tal qual a Escala Richter para terremotos, porém, variados tipos de dados teriam que ser utilizados para descrever erupções vulcânicas, com partes sendo quantitativas e outras qualitativas, evidenciando a dificuldade de sua classificação.

CRITÉRIOS	VEI 0	VEI 1	VEI 2	VEI 3	VEI 4	VEI 5	VEI 6	VEI 7	VEI 8+
Descrição	não explosivo	pequeno	moderado	moderado -grande	grande	muito grande	—————	—————	—————
Volume ejetado (m³)	<10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁹	10 ⁹ -10 ¹⁰	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ¹¹ -10 ¹²	>10 ¹²
Altura da coluna eruptiva (km)	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	—————	—————	—————
Descrição qualitativa	← efusivo →	← explosivo →	← severa, violenta, terrível →	← cataclísmico, colossal →	—————	—————	—————	—————	—————
Classificação	← Havaiana →	← Estromboliana →	← Vulcaniana →	Pliniana	—————	—————	—————	—————	—————
Duração da erupção contínua (horas)	—————	<1	—————	—————	—————	>12	—————	—————	—————
Injeção troposférica	insignificante	menor	moderado	substancial	—————	—————	—————	—————	—————
Injeção estratosférica	nenhum	nenhum	nenhum	possível	definitiva	significante	—————	—————	—————

Figura 14. Índices de Explosividade Vulcânica (VEI), variando de 0 a +8, com todos os critérios utilizados na caracterização dos índices (extraído de USGS, 2022¹⁷).

9. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO VULCÂNICO

Dos 1500 vulcões subaéreos ativos no planeta menos de 10% apresentam monitoramento terrestre regular (Rogic et al., 2019), sendo atribuída maior importância ao acompanhamento da atividade vulcânica naqueles que se encontram próximos de áreas densamente povoadas. Neste cenário, o sensoriamento remoto pode ser utilizado de forma complementar nos vulcões em que o monitoramento realizado no solo já é uma atividade regular. Além disso, trata-se de uma fonte inestimável de obtenção de dados para vulcões em regiões inacessíveis ou em erupção, quando a segurança no local não é garantida.

O monitoramento vulcânico por sensoriamento remoto permite detectar alterações no edifício vulcânico. Quando realizado de forma constante, imagens e dados coletados permitem mapear mudanças em seu estado de atividade, estabelecendo parâmetros para realizar previsões de seu comportamento e delimitar seus riscos associados. A morfologia de corpos vulcânicos é uma propriedade extremamente importante, visto que, as taxas de deformação do solo irão indicar a ocorrência de deflação ou inflação do edifício, onde, além de indicarem contínuos processos cíclicos de desgaseificação do sistema magmático, refletem a movimentação do magma na subsuperfície. Desta forma, o processo de inflação sugere a entrada de novo magma na câmara magmática, o que geralmente ocorre entre e, especialmente, antes de processos eruptivos. Já a deflação indica o contrário, associada a

¹⁷ Disponível em: <https://www.usgs.gov/observatories/yvo/news/volcanic-explosivity-index-a-tool-comparing-sizes-explosive-volcanic>. Acesso em: 02/10/2024.

saída do material magmático contido em seu interior, comumente ocorrente após erupções (Pyle et al., 2013; Fig. 15).

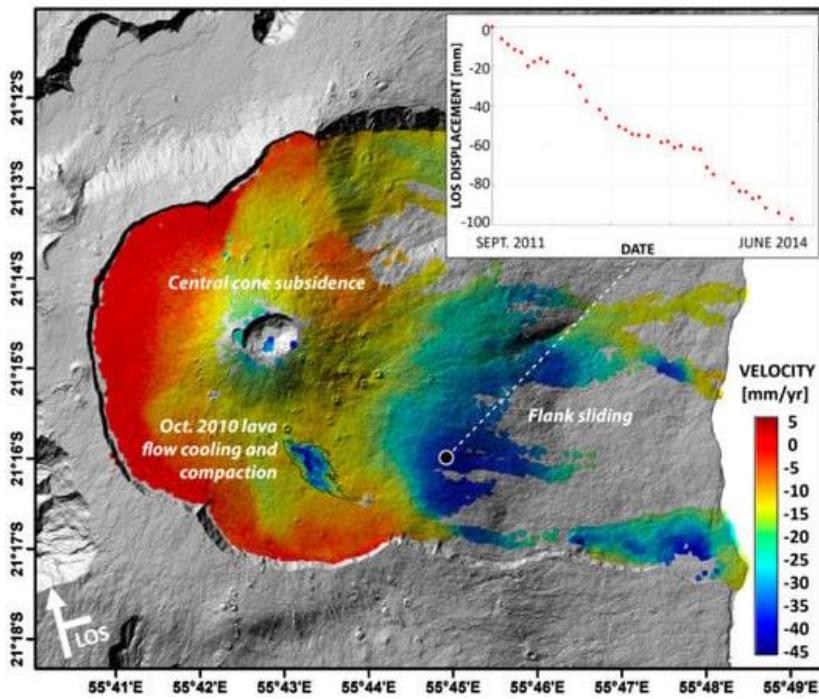


Figura 15. Velocidade de deslocamento associada a deformações no vulcão Piton de la Fournaise após erupção de 2007 (extraído de Richter e Frogner, 2020).

De forma complementar, a análise das assinaturas térmicas emitidas do vulcão é igualmente importante, para estabelecer a presença de materiais em alta temperatura na superfície terrestre, e determinar a localização de crateras vulcânicas, assim como lagos e fluxos de lava (Blackett, 2017). O uso do sensoriamento remoto no monitoramento vulcânico não se limita apenas ao acompanhamento do comportamento de um vulcão, mas é de extrema importância nas modelagens de processos sujeitos a ocorrer, permitindo delimitar a amplitude e alcance da dispersão de materiais vulcânicos, assim como seus trajetos mais prováveis. Desta forma, é uma ferramenta crucial na análise de riscos, auxiliando no mapeamento e planejamento de evacuações, visando menor impacto social e econômico em decorrência de erupções vulcânicas.

Além da utilização do sensoriamento remoto em fases pré-eruptivas, permitindo a análise da estrutura do vulcão e de seu comportamento, dados muito importantes podem ser obtidos de forma síncrona, em fases sin-eruptivas, embora os apresentados anteriormente continuem sendo utilizados, porém, em um caso real de erupção. Nesta fase, o monitoramento preciso dos produtos vulcânicos ejetados para a atmosfera (gases e cinzas) é crucial, principalmente no que diz respeito ao controle de tráfego aéreo, devido a possibilidade de acidentes caso transportes aéreos naveguem para áreas com presença de cinzas vulcânicas. Acompanhar seu trajeto a áreas potencialmente impactadas também é uma importante função

(Pyle et al., 2013), já que sua aspiração e acúmulo em solo trazem grandes problemas a comunidades afetadas.

Em fases pós-eruptivas, o sensoriamento remoto também pode ser utilizado, para estudo de depósitos causados por movimentos de massa advindos de vulcões, permitindo a realização de análises temporais acerca da geomorfologia da área e também possibilitando estudos a cerca dos perigos em si. A avaliação de áreas atingidas ou que tenham sido afetadas de alguma forma também é possível, além de ser uma forma de auxílio para a recuperação de comunidades que tenham sido atingidas e precisem passar por deslocamentos.

10. MONITORAMENTO ATUAL DO NEVADO DEL RUIZ

O programa de monitoramento de vulcões na Colômbia teve início em 1985, após a erupção do Nevado del Ruiz que gerou um lahar de grandes proporções durante a noite sem que houvesse alertas à população local, ocasionando a perda de mais de 25.000 vidas. Devido a este acontecimento ficou claro a necessidade de acompanhar a atividade vulcânica ocorrente no país, principalmente em vulcões mais próximos de áreas populosas, assim, o programa tem a função de monitorar o comportamento dos vulcões, mapear áreas ameaçadas, modelar possíveis dispersões de produtos vulcânicos e emitir alertas sobre a atividade destes. Atualmente, doze vulcões ativos são monitorados, incluindo o Nevado del Ruiz, que apresenta o Observatório Vulcanológico e Sismológico de Manizales como principal centro de monitoramento.

10.1. Redes de Monitoramento

Diversos parâmetros devem ser considerados durante o monitoramento vulcânico, pois a integração de diferentes métodos de análise permite o estabelecimento de informações mais confiáveis acerca do andamento de uma atividade vulcânica. As redes de monitoramento do Nevado del Ruiz contam com a coleta de dados sobre a deformação do terreno, geofísica, geoquímica e sismologia (Anexo 4).

10.2. Estados de Alerta Vulcânico e Boletins

Através do constante monitoramento vulcânico é possível fornecer classificações de sua atividade, permitindo estabelecer os perigos geológicos que podem estar associados a estes, as chances de erupção e o direcionamento das medidas que devem ser tomadas pela população em cada cenário, sendo assim essencial para a gestão de riscos. A primeira classificação para comportamento das atividades vulcânicas foi instalada na Colômbia a nível nacional em 2007, considerando mudanças sequenciais contínuas de atividade. No entanto,

nem sempre elas seguem estas ordens até uma erupção. Além disso, havia atribuição temporal em relação a atividade eruptiva, estabelecendo semanas ou dias até o evento, o que poderia não ocorrer de fato. Assim, em 14 de setembro de 2023 o Serviço Geológico Colombiano (SGC) alterou o esquema de classificação de atividade vulcânica no país, visando otimizar a gestão de riscos vulcânicos e estando de acordo com as descrições utilizadas a nível global. O esquema atual se refere a estados de alerta vulcânico, sendo relacionados à probabilidade da ocorrência de uma erupção vulcânica (Anexo 5), diferente da classificação anterior, esta é atemporal e não considera alterações progressivas na atividade (Servicio Geológico Colombiano, 2023¹⁸).

A partir do monitoramento são emitidos boletins semanais e mensais, apresentando as principais alterações em relação à atividade vulcânica ocorrente no período anterior. Boletins extraordinários também são gerados quando há atividade discrepante em relação a atividade comumente apresentada pelo vulcão, mostrando que houve alteração anômala em seu comportamento, podendo levar a maior probabilidade de erupção.

10.3. Mapa de Ameaças Vulcânicas Atual

O mapa de ameaça vulcânica atual do Nevado del Ruiz foi feito pelo Serviço Geológico Colombiano no ano de 2015 (Fig. 16), considerando como ponto de emissão de materiais vulcânicos a cratera Arenas, sendo projetado para erupções que alcançam níveis de VEI 3-4. Em sua confecção foi realizada ampla análise dos depósitos associados ao vulcão nos últimos 10.000 anos, identificando os processos vulcânicos passíveis de ocorrência, sendo então utilizados diversos programas que simulassem estes processos, permitindo zonear as áreas suscetíveis a ameaças. As zonas de ameaça são divididas em alta, média e baixa, de acordo com os processos e as intensidades que estes podem atingir, assim como pela espessura e raio que os materiais transportados pelo vento podem se depositar.

¹⁸ Disponível em: [https://srvags.sgc.gov.co/PortalWeb/Hoja-Informativa-esquema-medicion-actividad-volcanica-SGC-\(14-09-2023\).pdf](https://srvags.sgc.gov.co/PortalWeb/Hoja-Informativa-esquema-medicion-actividad-volcanica-SGC-(14-09-2023).pdf). Acesso em: 10/05/2024.

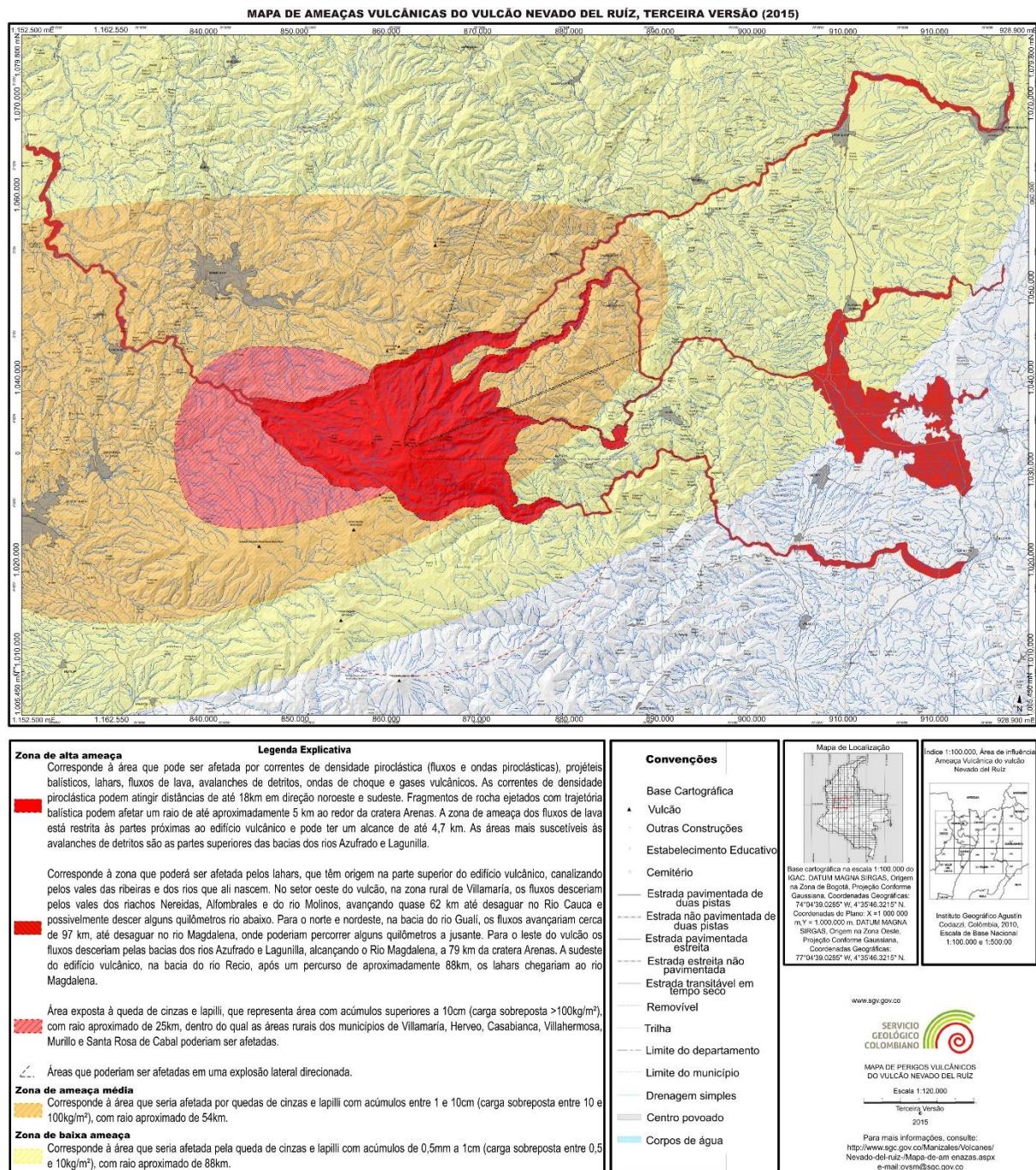


Figura 16. Mapa de ameaças vulcânicas do vulcão Nevado del Ruiz de 2015 (modificado de Servicio Geológico Colombiano, 2015).

11 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação dos perigos vulcânicos é feita neste trabalho utilizando sensoriamento remoto, através do comportamento da radiação eletromagnética em relação à superfície terrestre (Florenzano, 2007). Os sensores nesta metodologia podem ser classificados de acordo com a fonte da radiação eletromagnética trabalhada. Quando de origem natural, sendo refletida da luz solar ou emitida da própria superfície que está sendo estudada, o sensor é do tipo passivo. Porém, quando a radiação eletromagnética utilizada for de origem artificial, criada a partir dos próprios sensores, estes são chamados de sensores ativos (Fiqueiredo, 2005).

11.1. Sensoriamento Passivo

11.1.1. Sensoriamento Remoto Multiespectral

O espectro eletromagnético é separado em intervalos de comprimentos de onda da radiação eletromagnética, ou bandas espectrais. Diferentes materiais podem apresentar espectros específicos, assim, a emissão de radiação eletromagnética de cada material apresenta uma assinatura característica. A partir disso, a utilização de sensores multiespectrais em satélites é baseada na captação destas bandas, permitindo a determinação de materiais presentes na área e sua análise (Fig. 17).

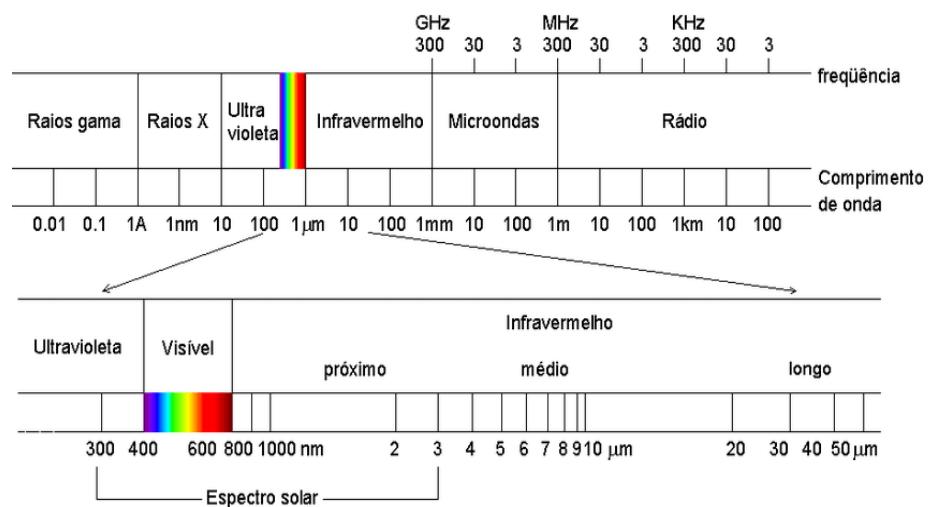


Figura 17. Espectro eletromagnético separado por intervalos de comprimentos de onda da radiação eletromagnética e suas frequências (extraído de Dornelles, 2008).

Com imagens da mesma região em diferentes bandas, é possível realizar composições coloridas, onde as bandas são analisadas de forma conjunta. Por meio do sistema RGB, três bandas serão associadas a canais de cores de forma ordenada, assim, a primeira banda escolhida irá para o canal R (red-vermelho), a segunda para o G (green-verde) e a última para o B (blue-azul). Desta forma, os materiais registrados por cada banda serão visualizados em cores diferentes, facilitando a análise da cobertura do terreno (Fig. 18).

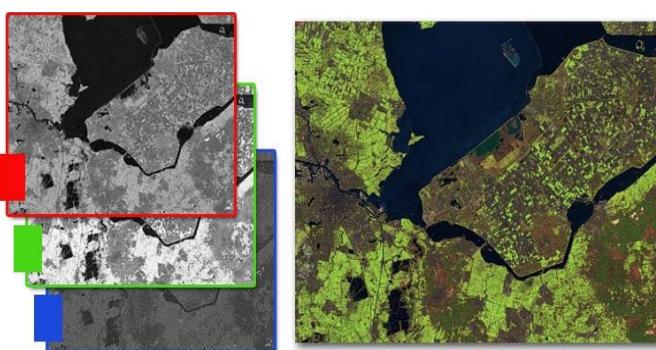


Figura 18. Exemplo de composição RGB, onde três bandas associadas a canais de cores formam uma imagem colorida (extraído de Geoinnova, 2019¹⁹).

¹⁹ Disponível em: <https://geoinnova.org/blog-territorio/composiciones-rgb-de-imagenes-satelite/>. Acesso em: 05/02/2024.

Através da correlação entre uma série de bandas é possível produzir a Análise por Componentes Principais (PCA), onde novas imagens sem correlação entre as bandas são produzidas, sendo chamadas de principais componentes, a primeira contém a maior quantidade de informações enquanto as últimas imagens concentram ruídos (Crosta, 1993). Através de modificações neste procedimento é realizado o Realce por Decorrelação, onde não são utilizadas todas as bandas de uma imagem e sim uma composição colorida, com o objetivo de ressaltar alguma característica do local de estudo.

11.1.2. Sensoriamento Remoto Termal

No espectro eletromagnético, o intervalo entre 3 a 14 μm é chamado de infravermelho termal, sendo que, toda matéria que se encontra acima de 0 K (Kelvin) produz emissões eletromagnéticas nesta faixa espectral. São duas as principais leis físicas que regem o infravermelho termal, a Lei de Stefan–Boltzmann, em que prevê que a energia e temperatura são relacionadas, assim, quanto maior a temperatura de um corpo, maior será a energia eletromagnética emitida por ele. A outra lei é a de Deslocamento de Wien, que estabelece que o comportamento de emissões de radiação eletromagnética muda de acordo com a temperatura de um dado corpo (Fig. 19).

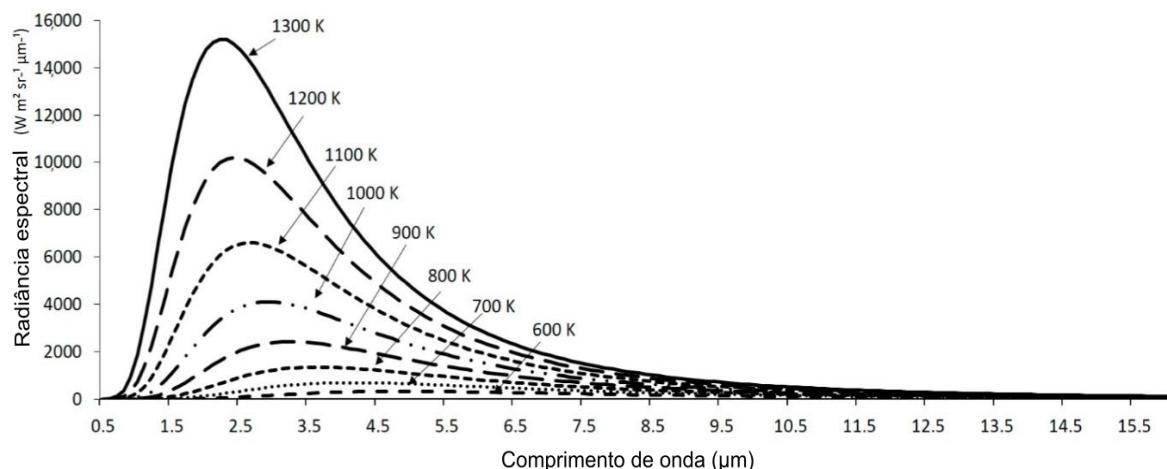


Figura 19. Relação entre a Lei de Stefan–Boltzmann e a Lei de deslocamento de Wien, mostrando a variação do comportamento da radiância espectral e comprimento de onda de corpos de acordo com sua temperatura (extraído de Blackett, 2017).

Dados termais podem ser obtidos em qualquer horário, porém a seleção destes depende do objetivo do estudo e de condições climáticas. No caso do monitoramento da superfície vulcânica, a radiação solar diurna pode impactar os resultados, ao ser um componente adicional da temperatura registrada. Desta forma, o ideal seria o registro de dados noturnos, com o sensor livre de efeitos de reflexões a partir de uma fonte externa de energia, isolando a energia emitida da própria superfície terrestre (Blackett, 2017).

11.2. Sensoriamento Ativo

11.2.1. Radar de Abertura Sintética (SAR)

O Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar*) é o resultado da busca por uma forma de obtenção de dados que melhorasse a resolução espacial das imagens geradas pelos sistemas radar (INPE, 2023²⁰). Quanto maior a antena dos sensores de aquisição, melhor a resolução espacial. Porém, por questões logísticas, antenas de menor comprimento são mais práticas de serem transportadas e mantidas em sensores orbitais, sendo assim criada a “abertura sintética”. No SAR, a repetição do imageamento do mesmo ponto com uma antena de pequeno porte, simula a aquisição realizada por uma antena de maior comprimento (NASA, 2023²¹; Alaska Satellite Facility, 2023²²; Sandia National Laboratories, 2023²³).

Através desta técnica, sensores remotos emitem sinais eletromagnéticos em direção à superfície terrestre por meio de visadas laterais. O sinal, ao atingir a superfície terrestre, sofre retroespalhamento e parte deste sinal pode retornar em direção ao satélite. Neste caso, o tempo entre a emissão e o retorno do sinal define a distância percorrida do sensor até a superfície e de volta ao sensor. Por estar em uma altitude conhecida em relação ao elipsóide de referência, a posição do sensor permite o cálculo da altitude dos pontos da superfície e estabelece modelos digitais de elevação com relativa precisão.

As altitudes obtidas pelo SAR são calculadas de acordo com componentes geométricos presentes na visada lateral de aquisição (Fig. 20). Em relação a linha tracejada horizontal, o ângulo na qual os sinais eletromagnéticos são emitidos definem o ângulo de depressão, que irá delimitar a área a ser imageada. Quando o sinal chega à superfície terrestre, o ângulo formado com a normal gera o ângulo de incidência, que varia de acordo com mudanças de declividade. Assim, cada ponto terá um diferente comportamento de retroespalhamento do sinal na superfície. A área na qual o radar irá continuamente imagear pode ser chamada de Faixa Imageada ou Swath Width, sendo limitada pelo Near Range, região mais próxima do radar, e pelo Far Range, a mais distante. A imagem gerada através da distância exata entre pontos da superfície terrestre e o sensor corresponde ao Slant Range; já o Ground Range será a projeção destes pontos em relação ao elipsóide de referência utilizado (Alencar, 2013).

²⁰ Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/radar.html>. Acesso em: 20/12/2023.

²¹ Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>. Acesso em: 20/12/2023.

²² Disponível em: <https://ASF.alaska.edu/information/sar-information/what-is-sar/>. Acesso em: 20/12/2023.

²³ Disponível em: <https://www.sandia.gov/radar/pathfinder-radar-isr-and-synthetic-aperture-radar-sar-systems/what-is-sar/>. Acesso em: 20/12/2023.

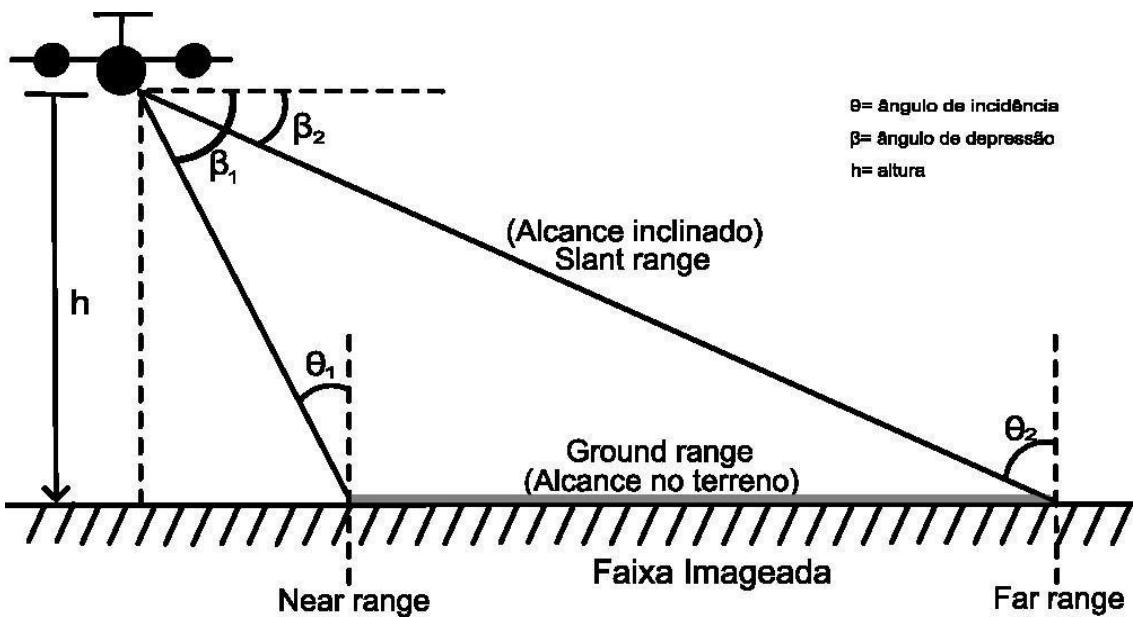


Figura 20. Componentes geométricos de radares de visada lateral, near range e far range são mantidos em inglês, conforme utilizado internacionalmente (extraído de Alencar, 2013).

A utilização do método SAR não é restrita por horários ou pelas condições da atmosfera, sendo possível realizar o imageamento mesmo através das nuvens. Isto se deve aos comprimentos de onda utilizados pelo radar, em sua maioria centimétricos, que em sua maioria não interagem com gases atmosféricos ou material em suspensão.

11.2.2. Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR)

A Interferometria de Radar de Abertura Sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar) visa a análise de deformação da superfície, tendo como base o método SAR. Porém, o InSAR necessita que o imageamento da área seja realizado mais de uma vez em momentos diferentes, registrando movimentações da superfície terrestre (USGS, 2023²⁴).

A variação de altitude dos pontos do terreno é determinada pela diferença de fase entre as ondas dos sinais eletromagnéticos emitidos durante as passagens do satélite pelos mesmos pontos do solo (NASA, 2023²⁵; Fig. 21). Assim, se a diferença de fase entre eles for positiva, indicando que o sinal eletromagnético percorreu um trajeto mais longo é uma evidência da atuação do processo de subsidência na região, porém, se o contrário ocorrer, com o sinal eletromagnético percorrendo um trajeto mais curto, tendo uma diferença de fase negativa, há processos de elevação da superfície em ocorrência (USGS, 2018²⁶).

²⁴ Disponível em: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/insar-satellite-based-technique-captures-overall-deformation-picture>. Acesso em: 20/12/2023.

²⁵ Disponível em: [https://nисар.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/](https://nисar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/). Acesso em: 20/12/2023.

²⁶ Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/land-subsidence-in-california/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar>. Acesso em: 20/12/2023.

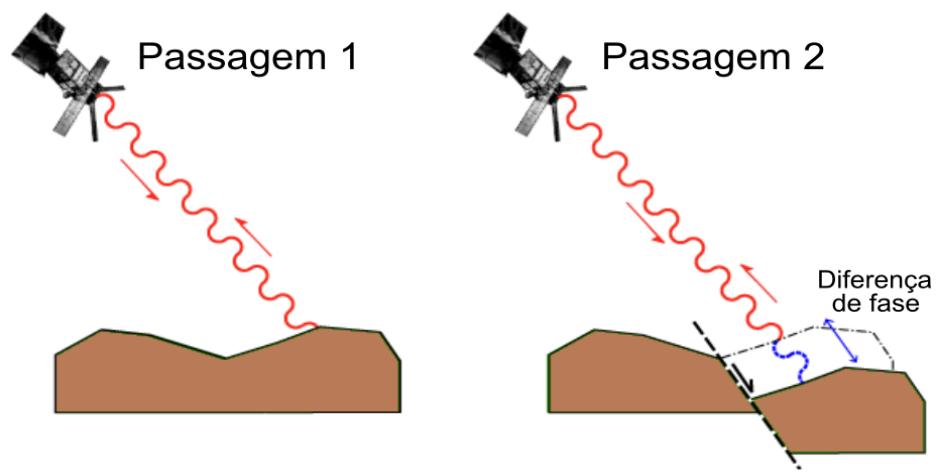


Figura 21. Efeito da diferença de fase entre ondas. Na segunda passagem do satélite, o trajeto percorrido pela onda eletromagnética é mais longo se comparado a primeira passagem (extraído de Castellazzi e Schmid, 2019).

A partir do InSAR é possível produzir interferogramas, em que os intervalos de cores cílicos representam a deformação sofrida pelo terreno entre as aquisições de imagens. Estes ciclos de cores variam de -2π a 2π e recebem o nome de franjas interferométricas (Fig. 22; Nievinski, 2004). A progressão destas franjas no interferograma permite produzir mapas de deformação de precisão centimétrica, onde são interpretadas a movimentação e suas intensidades.

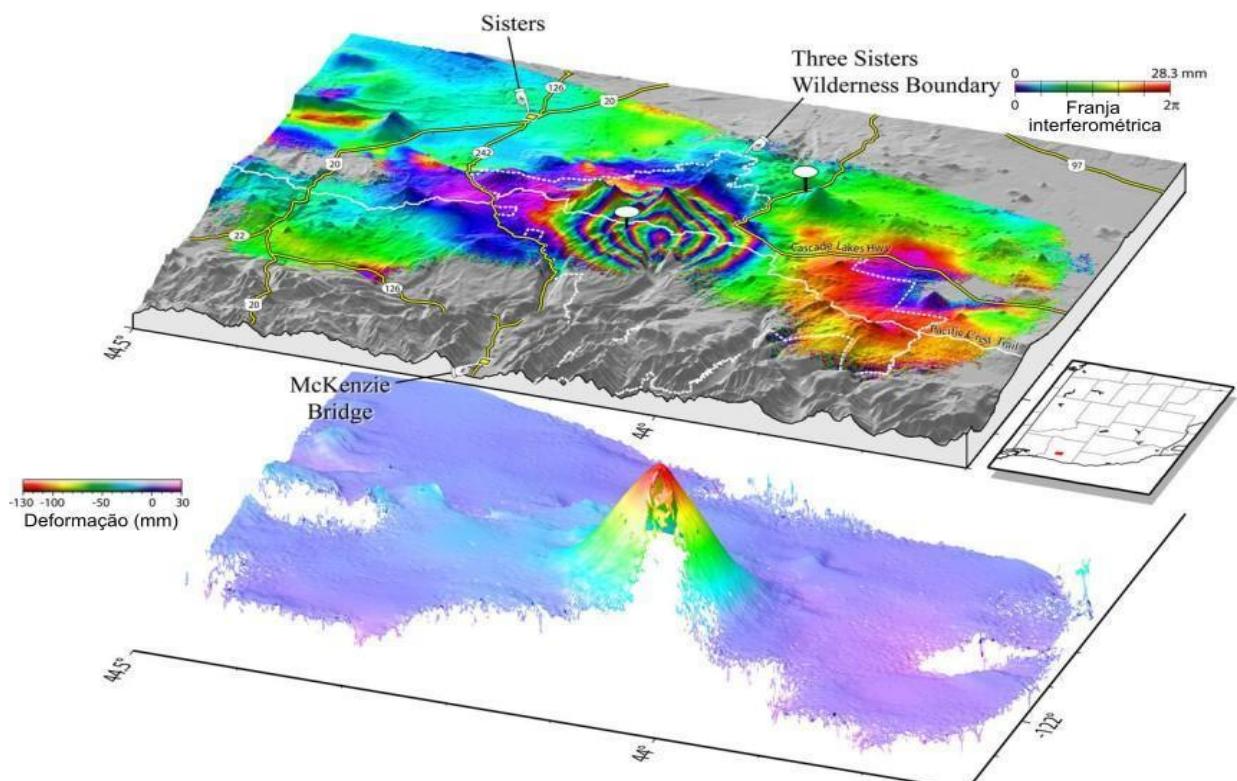


Figura 22. Exemplo de interferograma no modelo superior da imagem. Cada ciclo de cor é uma franja interferométrica, em que sua progressão forma a imagem abaixo de deformação presente na área, neste caso ocorre elevação da superfície, nome dos locais não apresenta tradução (extraído de USGS,2023²⁷).

²⁷ Disponível em: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/insar-satellite-based-technique-captures-overall-deformation-picture>. Acesso em: 20/12/2023.

11.3. Modelagem

A etapa de modelagem é realizada por meio de programas que utilizam formulações matemáticas bem estruturadas para fornecer resultados relativos aos trajetos que os movimentos de massa irão percorrer, de forma que sejam o mais próximo possível do real em caso de uma situação de perigo vulcânico. A confecção das modelagens foi feita por meio de duas ferramentas, o *LaharFlow* e o *Ash3D*, ambas com uma interface de simples compreensão, permitindo um fácil acesso no momento de projetar as simulações e interpretar resultados.

11.3.1. *LaharFlow*

A modelagem de propagação de fluxos de lahar é realizada a partir da ferramenta *LaharFlow* (Fig. 23 e 24), disponibilizada pela Universidade de Bristol (*LaharFlow*, 2016²⁸). Sua base topográfica é um modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com 30 metros de resolução, que irá condicionar o movimento do lahar em relação ao relevo. Vários parâmetros são predefinidos, como valores mínimo e máximo de atrito granular, limite entre atrito fluido e granular, porosidade do leito, taxa e profundidade de erosão, além da indicação da fonte inicial dos fluxos, na qual são definidos sua localização, volume mobilizado, concentração de sólidos e tempo de duração do movimento de massa. Além de apresentar os trajetos percorridos por lahar, ainda são fornecidos dados sobre sua profundidade, velocidade, concentração de sólidos e mudanças na elevação topográfica de acordo com a variação de tempo. Além de serem realizadas simulações relativas ao lahar, modelagens de lava também puderam ser realizadas a partir da simplificação de certas características para se adequar aos parâmetros da ferramenta.

²⁸ Disponível em: <https://www.laharflow.bristol.ac.uk//help/userguide/FrontPage.php>. Acesso em: 12/06/2023.

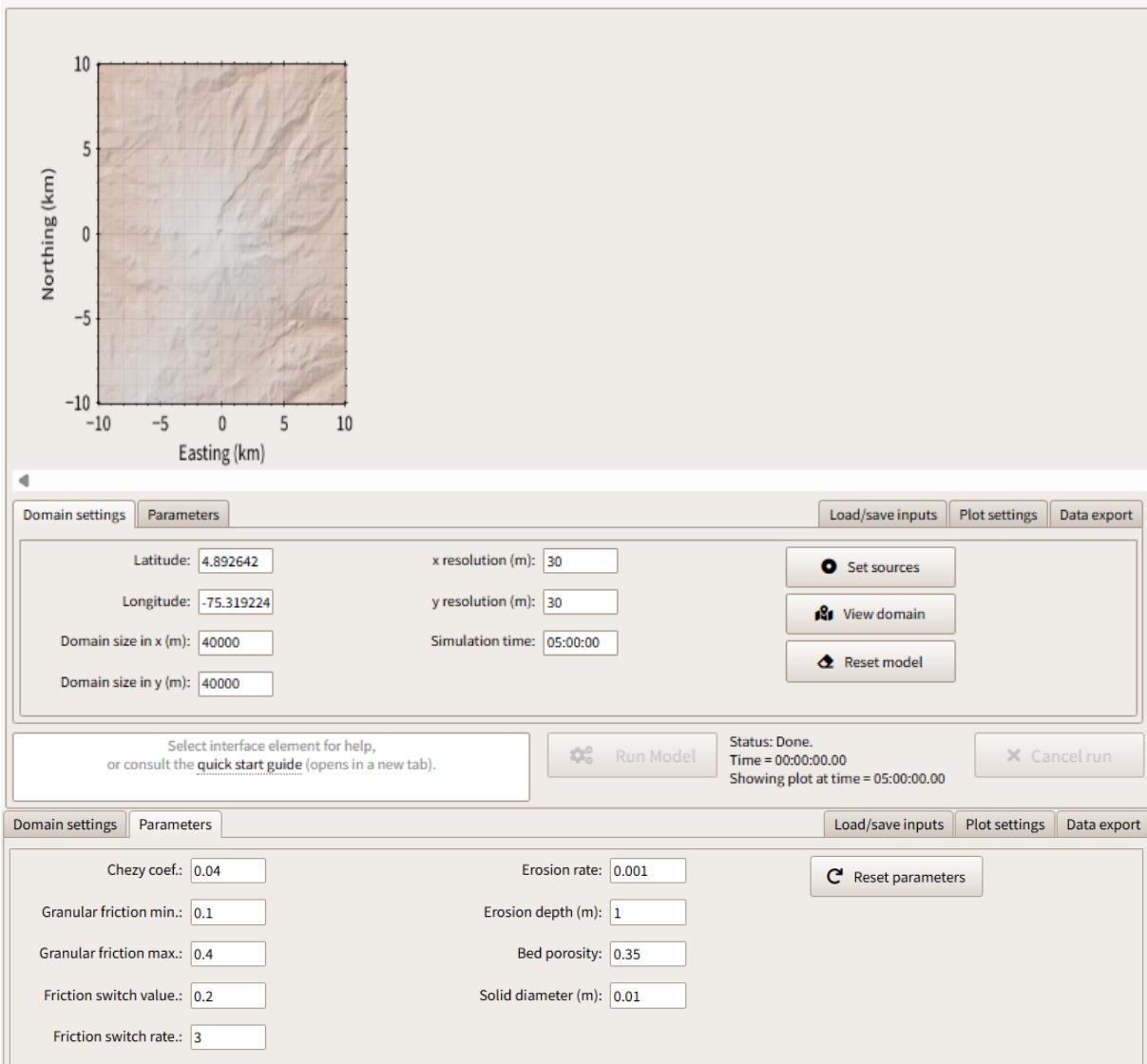


Figura 23. Interface da ferramenta *LaharFlow*, com valores de parâmetros básicos recomendados e utilizados em simulações,

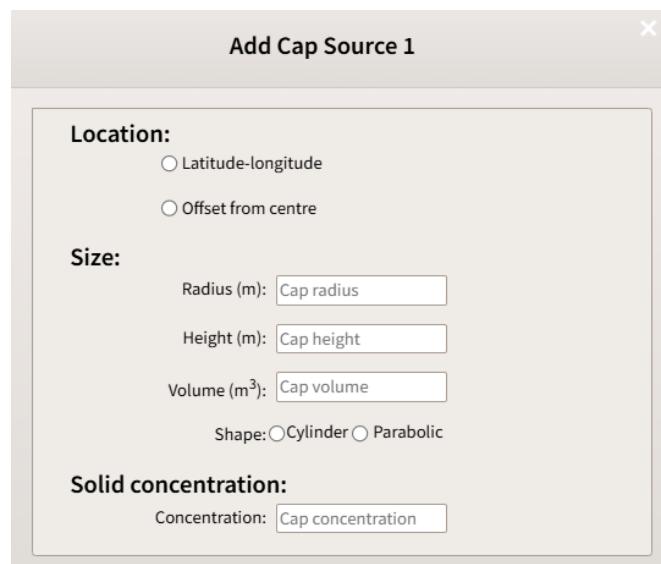


Figura 24. Função da ferramenta *LaharFlow*, onde são adicionadas informações sobre as fontes de lahar.

11.3.2. Ash3D

O Ash3D (Fig. 25) foi desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2013²⁹) visando antecipar o trajeto de nuvens de cinzas e onde iriam se depositar. Para realizar as modelagens é utilizado um modelo atmosférico euleriano tridimensional, sendo necessário informações de localização sobre o vulcão, duração de erupção, duração de simulação, altura da pluma e volume do material que foi ejetado, assim como o horário na qual a modelagem irá ocorrer, devido as informações meteorológicas coletadas. Os resultados apresentam informações acerca da concentração, altura e dispersão na qual as cinzas iriam seguir, assim como os locais onde haveria deposição de cinzas e sua espessura, aeroportos a serem atingidos por estes processos também são informados, já que são extremamente afetados durante erupções vulcânicas.

The screenshot shows the 'Ash3d Job Edit' interface. It includes sections for 'Name' (Nevado del Ruiz Model), 'Run Type' (Both Airborne and Deposit), 'When Complete' (Do not send email), 'Volcano/Site' (Ruiz, Nevado del with coordinates and elevation), 'Start Time (UTC)' (2024-01-01 21:00), 'Simulation Duration' (Between 6 and 144 hours), 'Eruption Duration' (Between 0.1 and 24 hours), 'Plume Height' (0 km above sea level), and 'Erupted Volume' (km³).

Ash3d Job Edit
Job Created By Maithe Alvim (Maithe)

Simulation Duration
Between 6 and 144 hours.
A value is required and must be between 6 and 144 hours.
Default simulation duration is 24 hours (apply).

Name Nevado del Ruiz Model

Run Type Both Airborne and Deposit

When Complete Do not send email.
Model runs generally complete in about 10 minutes.

Volcano/Site Ruiz, Nevado del
Latitude: 4.895
Longitude: -75.323
Elevation: 5,321 m

Start Time (UTC) 2024-01-01 21:00

Eruption Duration Between 0.1 and 24 hours.
A value is required and must be between 0.1 and 24 hours.
Default eruption duration is 12 hours (apply).

Plume Height 0 km above sea level
Default plume height is 10 km above sea level. (apply).

Erupted Volume km³
Value if unspecified:
DRE: airborne ash fraction = 5%
Default erupted volume is 0.003 km³ (apply).

Figura 25. Interface da ferramenta Ash3D, mostrando parâmetros a serem preenchidos para confecção de modelagens.

11.4. Dados Utilizados

Os dados de sensoriamento passivo (Anexo 6) foram obtidos pela plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) e os de sensoriamento ativo (Anexo 7) pela plataforma Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). As imagens multiespectrais foram trabalhadas utilizando o software ENVI. As imagens no Visível e no Infravermelho Próximo e de Ondas Curtas foram diretamente utilizadas sem tratamentos além daqueles realizados antes de sua disponibilização (Level 2; USGS, 2024³⁰). Os dados SAR (topografia) foram tratados utilizando o software ArcMap, enquanto os dados InSAR foram

²⁹ Disponível em: <https://vsc-ash.wr.usgs.gov/ash3d-gui/#/>. Acesso em 05/09/2024.

³⁰ Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>. Acesso em 05/08/2024.

trabalhados com o software ESA SNAP (Anexo 8). Ao final, os produtos foram utilizados holisticamente para a elaboração de um mapa de perigos para fluxos de massa (Fig. 26).

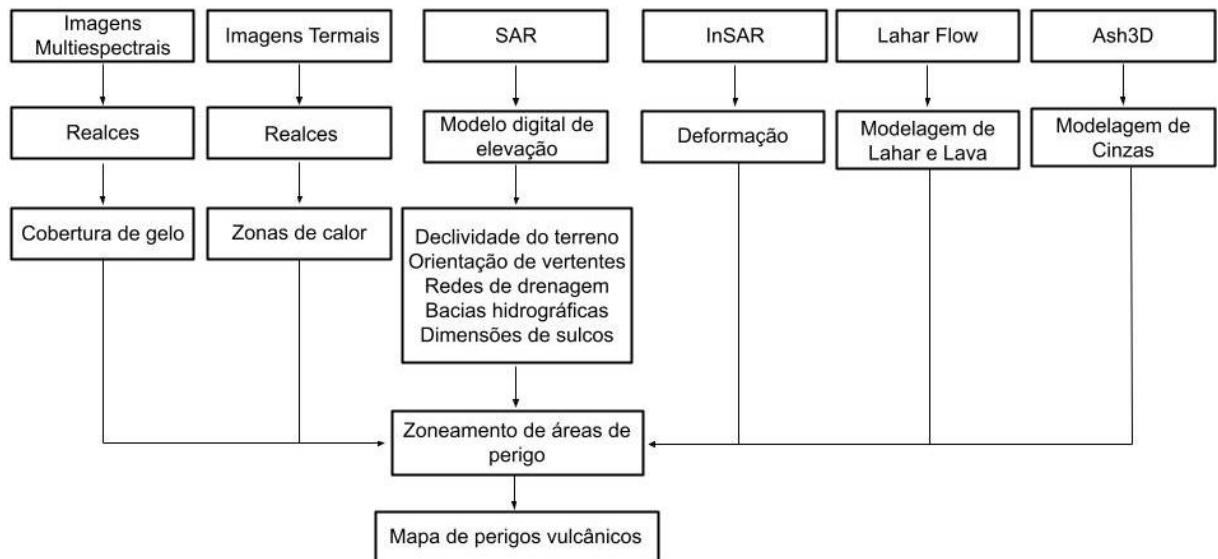


Figura 26. Organograma para elaboração de mapa de perigos para fluxos de massa, mostrando como todas as etapas são relacionadas.

12. RESULTADOS

12.1. Produtos do Sensoriamento Passivo

12.1.1. Sensoriamento Remoto Multiespectral

A composição de imagens multiespectrais permitiu delimitar regiões de cobertura de gelo e água no edifício vulcânico. A composição RGB 764 (SWIR2, SWIR1, Red; Fig. 24) foi utilizada apresentando coberturas bem destacadas, diferenciando áreas com e sem vegetação e, principalmente, a presença de gelo e água no topo do vulcão. Posteriormente, foi utilizada a banda Azul, para melhor diferenciar água e gelo (Anexo 9).

Na série temporal da cobertura do edifício de 2014 até 2024, não é visível a diminuição perene da área da calota causada estritamente por aquecimento global, mas sim uma mudança desta atribuída à sazonalidade (Fig. 27). Nos meses de maior pluviosidade, entre junho e setembro, a área de cobertura de gelo é mais extensa e no período de menor pluviosidade, representado nas imagens em janeiro e dezembro, a calota de gelo sofre derretimento, tendo diminuição de sua área e aparecimento de locais com presença de lagos de água mais concentrados na porção leste da cratera Arenas.

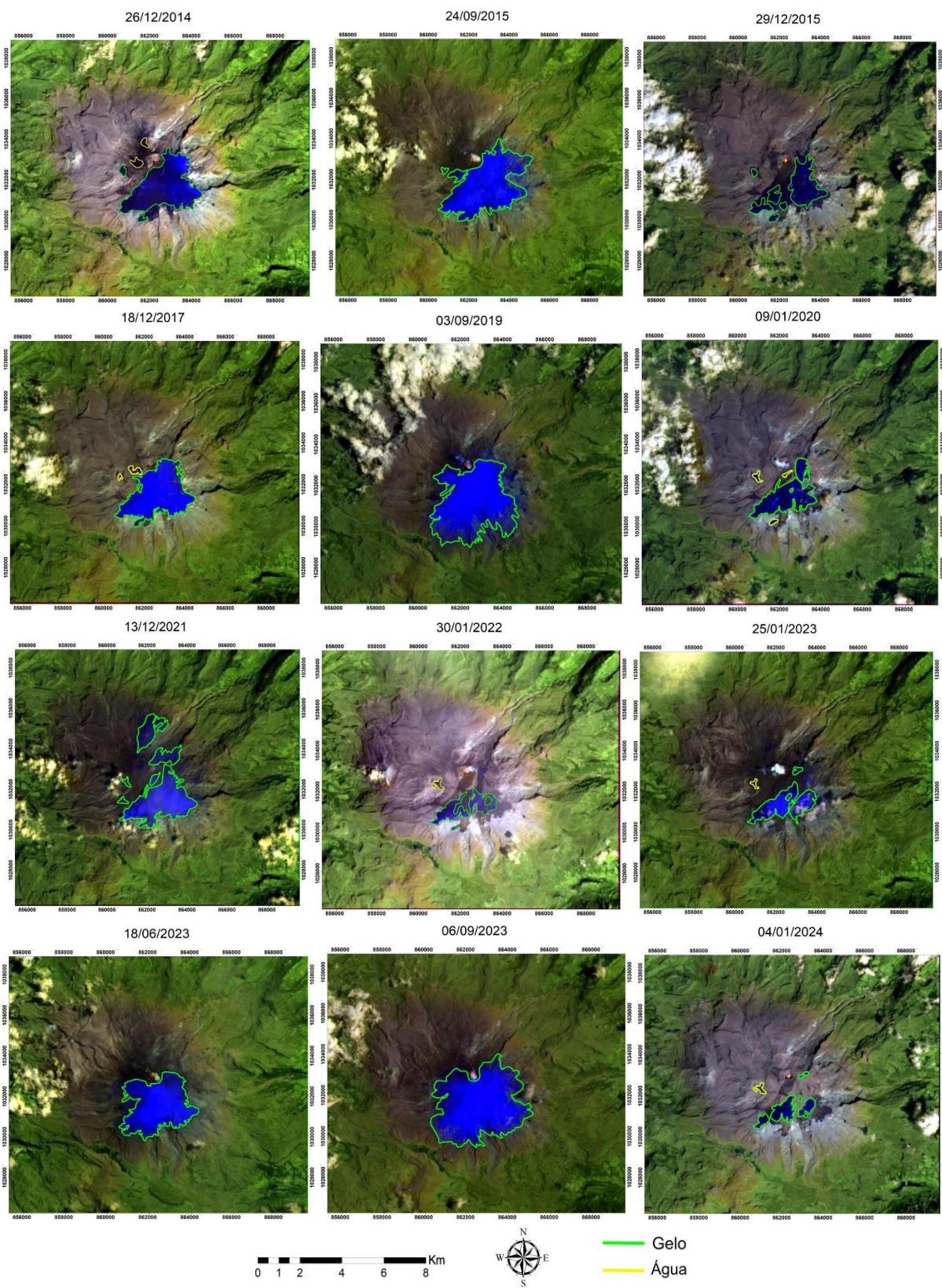


Figura 27. Histórico da evolução da cobertura do edifício do Nevado del Ruiz na composição RGB 764 (SWIR2, SWIR1, Red), desde 2014 até 2024, áreas identificadas como gelo e água são destacadas pelas cores verde e amarelo, respectivamente (SWIR-infravermelho de ondas curtas).

Visando estabelecer relações entre a cobertura de gelo e a geomorfologia do edifício vulcânico, é realizada a Análise por Componentes Principais (PCA) da composição de bandas

RGB (SWIR2, SWIR1, Red) onde a primeira banda foi selecionada, destacando a rugosidade do cone e suas zonas proximais.

A data de 04/01/2024 foi utilizada na PCA, sendo a mais recente e com menor área de gelo, tornando possível destacar partes do terreno, como áreas mais elevadas no edifício vulcânico e regiões de sulcos entre eles (Fig. 28). As áreas que apresentam morfologia elevada são as que possuem presença constante de gelo, em períodos de maior precipitação o gelo apresenta maior avanço nestes locais, enquanto os sulcos sofrem recuos. Já em períodos de menor precipitação, as áreas mais elevadas continuam mantendo maior cobertura de gelo e locais mais próximos a sulcos sofrem grandes recuos.

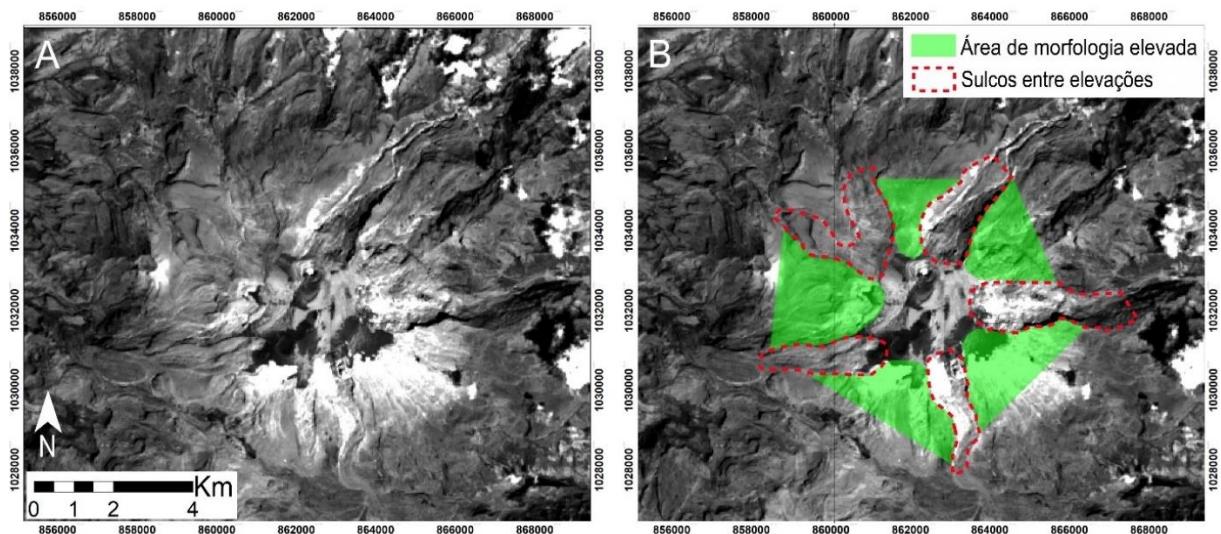


Figura 28. (A) PCA do edifício vulcânico do Nevado del Ruiz, a partir da composição de bandas RGB (SWIR2, SWIR1, Red) onde a primeira banda foi selecionada (B) PCA do edifício vulcânico com destaques em verde se referem a áreas de morfologia elevada, pontilhado vermelho destaca sulcos entre elevações.

12.1.2. Sensoriamento Remoto Termal

Para a análise da temperatura da superfície terrestre foram consultados os boletins emitidos pelo Serviço Geológico Colombiano (SGC), onde datas com registro de anomalias térmicas foram selecionados e escolhida a data com menor cobertura de nuvens (03/12/2023). O período de aquisição dos dados foi diurno e a contribuição da radiação solar não foi retirada, assim, locais que apresentam rocha exposta possuem temperaturas mais altas e onde há cobertura vegetal são mais frias. Além disso, as regiões de calota apresentam as menores temperaturas, sendo registrado até 2°C.

O principal objetivo da análise termal é identificar zonas de calor advindas de atividade vulcânica, nesta data, a maior temperatura registrada pelo sensor foi de 84°C, proveniente da cratera Arenas. Assim, além da região da cratera não há outras áreas em que material vulcânico (lava ou gases) esteja reconhecidamente sendo produzido (Fig. 29).

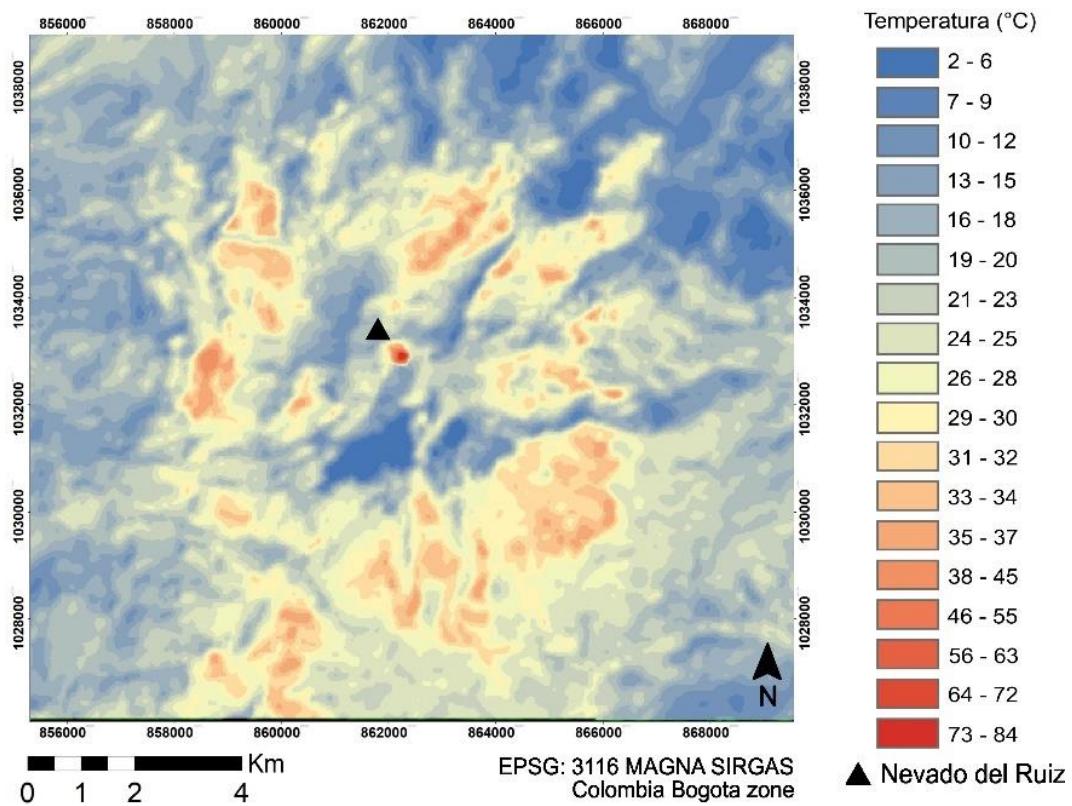


Figura 29. Temperatura superficial do edifício vulcânico do Nevado del Ruiz, em 03 de dezembro de 2023, destaque para a região da cratera Arenas com registro de 84°C.

12.2. Produtos do Sensoriamento Ativo

12.2.1. Topografia - SAR

A topografia do edifício vulcânico e de seus arredores é o principal fator condicionante de seus fluxos de massa, já que estes apresentam alta mobilidade, impulsionada pela gravidade. O edifício vulcânico apresenta vales em seus flancos, que agem como regiões confinantes (Fig. 30), já que possuem um trajeto de menor altitude cercado de ambos os lados por terrenos mais altos. Desta forma, os fluxos são canalizados e irão tender a percorrer estes trajetos, erodindo a superfície terrestre e transportando material para áreas mais distantes. Estes trajetos que antes eram bem confinados, passam a ter maior espaço disponível lateralmente ao alcançar áreas planas, de forma que o fluxo se espalhe para estas novas áreas enquanto avança, nestes locais, serão depositados materiais que foram incorporados ao fluxo anteriormente.

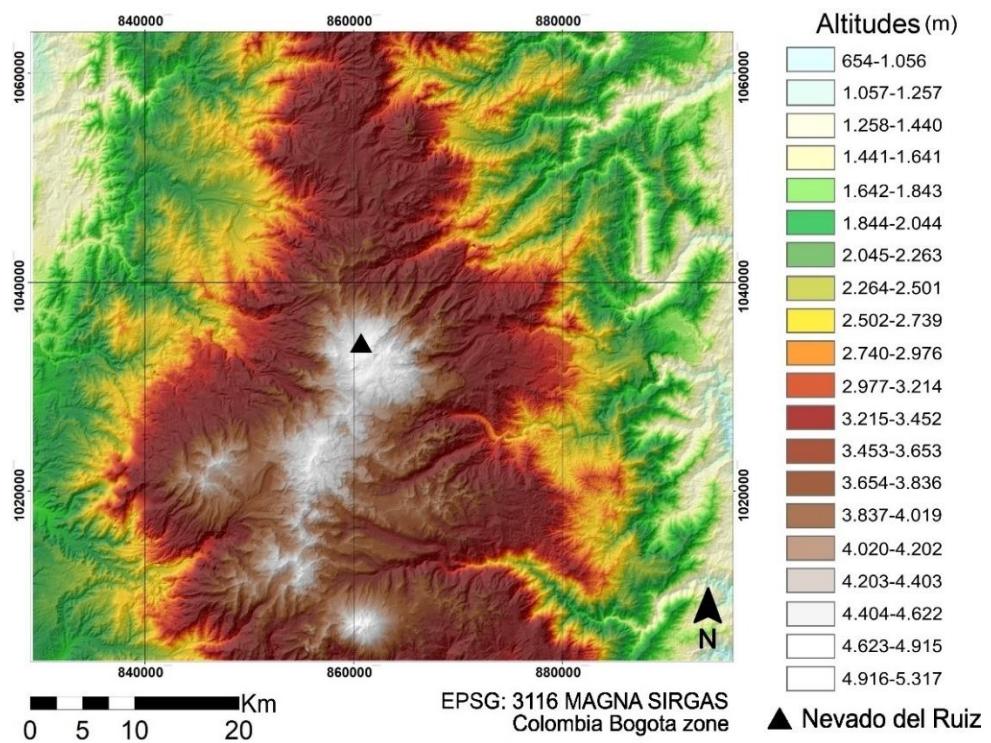


Figura 30. Mapa hipsométrico com sombreamento, Nevado del Ruiz (5.317 m) representa a maior altitude.

O edifício vulcânico do Nevado del Ruiz apresenta grande variação de declividade, com predominância de áreas de menor inclinação, não passando de 37° (Fig. 31), e eventuais inclinações abruptas. Nestas, aparecem vales que abrigam drenagens, com declividades atingindo até 83°. Estes vales de grande declividade seguem para caminhos de menor altitude, onde seus valores sofrem diminuição e posteriormente encontram regiões mais planas, nos quadrantes leste e oeste da área de estudo.

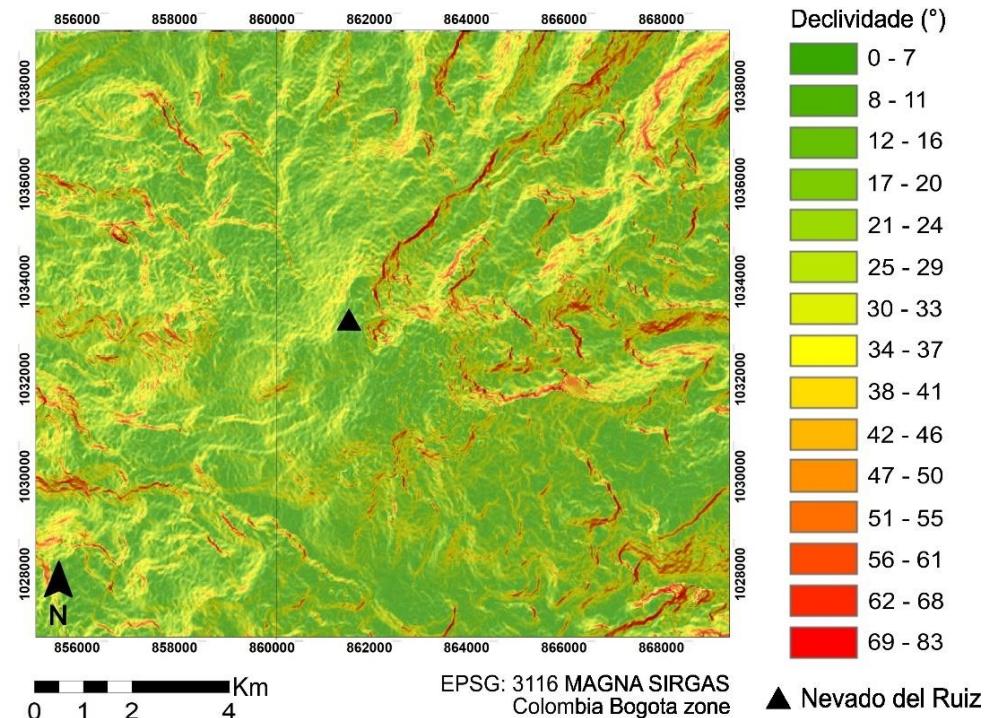


Figura 31. Mapa de declividade com sombreamento, foco no edifício vulcânico do Nevado del Ruiz.

O Nevado del Ruiz apresenta orientação de terreno bem variada devido a sua forma radial e a sua grande quantidade de sulcos (Fig. 32), o flanco orientado para norte apresenta sulcos em sua maioria de direção leste, oeste, noroeste e sudeste, seu flanco oeste apresenta sulcos voltados para sul, sudoeste, norte, noroeste, já os sulcos do flanco leste apresentam faces para sudeste, norte, oeste, noroeste. Além disso, é dado destaque novamente para regiões de vale, nas quais fluxos advindos do vulcão apresentam maior tendência de percorrer, cursos hídricos que desembocam na região leste da área de estudo apresentam faces voltadas para sudeste, noroeste, sul e norte, já os rios que correm para oeste da área têm orientação sudoeste e norte.

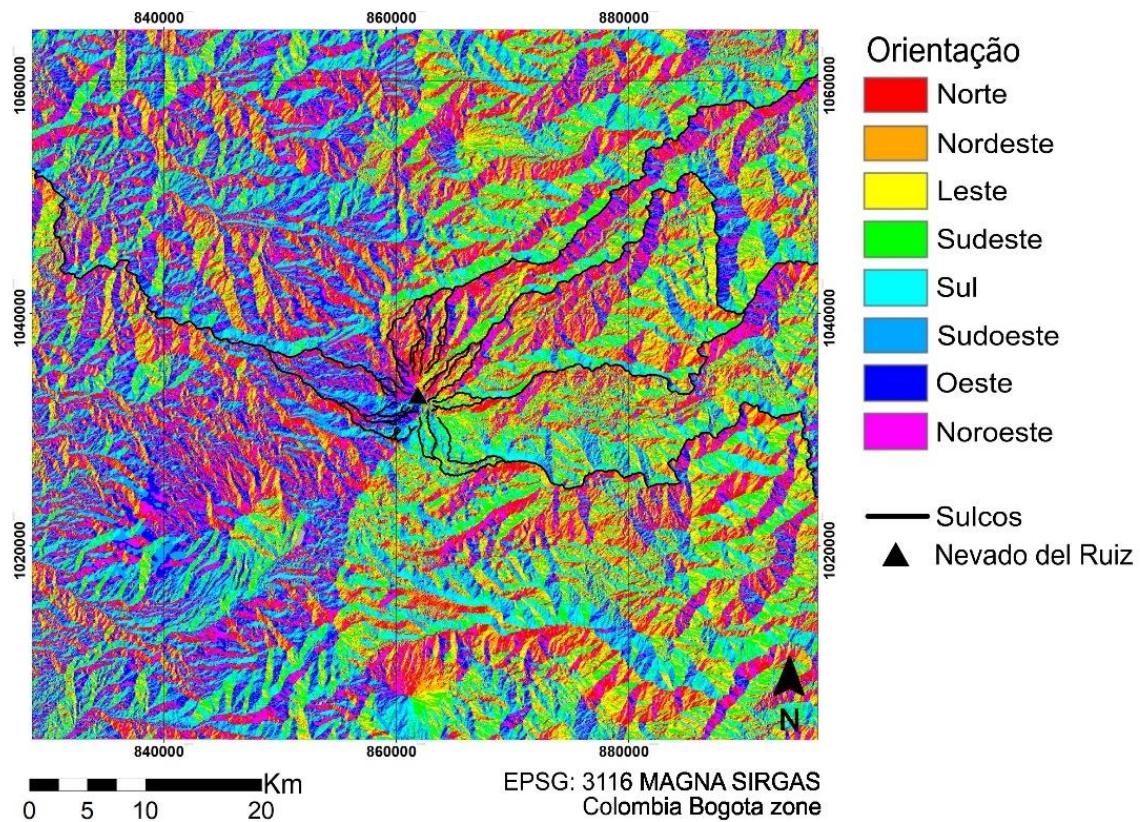


Figura 32. Mapa de orientação de vertentes com sulcos destacados.

O Nevado del Ruiz apresenta três divisores de água nas direções noroeste, nordeste e sudeste (Fig. 33), apresentando então três bacias hidrográficas com diversos rios importantes os quais absorverão os fluxos de massa vindos do vulcão. A partir destas bacias pode-se dividir os flancos em Flanco Norte, Flanco Oeste e Flanco Leste, cada um destes contém diversos sulcos agindo como redes de drenagem, direcionando e confinando os fluxos ali presentes.

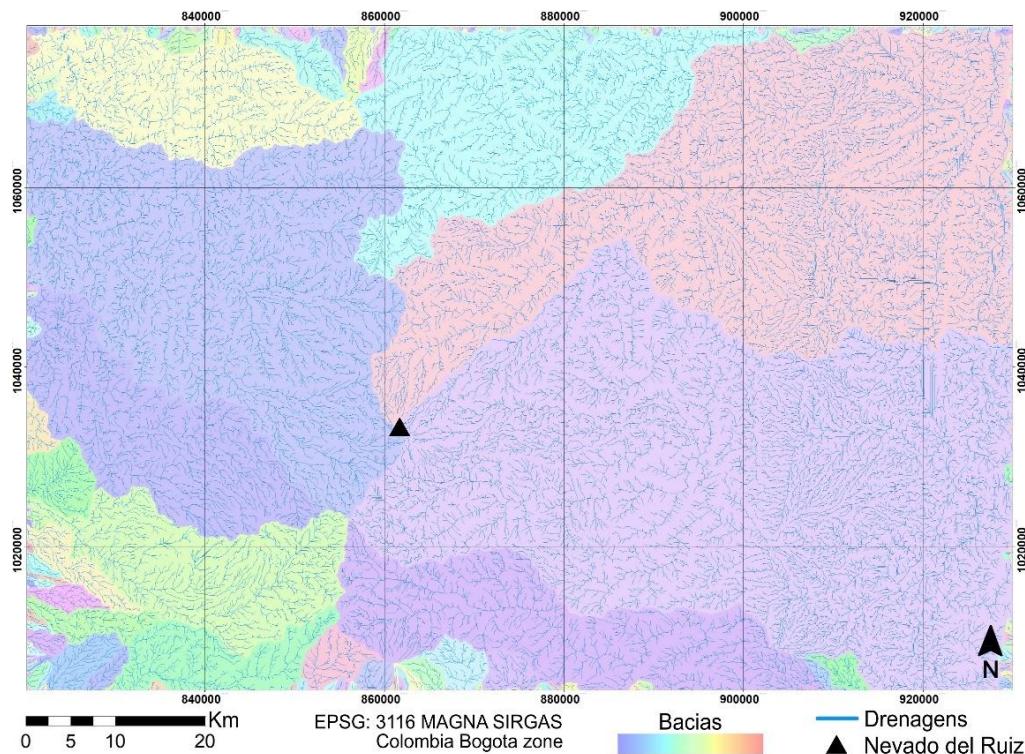


Figura 33. Mapa de redes de drenagens e delimitação de bacias hidrográficas.

A separação das bacias hidrográficas permite uma melhor análise dos perigos, sendo um critério para definir as cidades potencialmente atingidas por fluxos advindos de certos flancos (Anexo 10 e 11). Entretanto, os flancos Norte e Leste apresentam um problema de delimitação ao longo de um trecho do canal do Rio Lagunillas, região em que Armero estava localizada, devido a um desnível abrupto na topografia. Nesta região, na parte do relevo anterior e no trecho do desnível, o canal apresenta grande profundidade e declividade, confinando possíveis fluxos de massa que percorrem o canal e deixando estes restringidos na bacia hidrográfica do Flanco Leste. Porém, posteriormente ao desnível, a profundidade e declividade do canal são muito baixas, abandonando o caráter confinante e promovendo espalhamento e deposição de fluxos. Assim, fluxos provenientes do Flanco Leste poderiam atingir a bacia hidrográfica do Flanco Norte (Anexo 10).

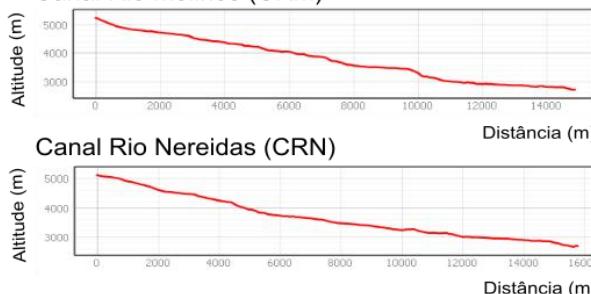
Projeções 3D direcionais para cada flanco do edifício vulcânico destacam as drenagens que se originam no cume do Nevado del Ruiz e a cidade mais próxima do percurso de fluxos de massa, junto há perfis de cada canal para evidenciar a diminuição da altitude que estes apresentam (Fig. 34). O Flanco Norte abriga a nascente do Rio Gualí, que recebe outras fontes d'água do topo do vulcão até seu curso correr para nordeste. O Flanco Oeste se divide em duas áreas principais de redes de drenagem, a setentrional constitui o Rio Molinos e a meridional o Rio Nereidas, ao longo de seus trajetos, os sulcos que originam seus cursos d'água se unem dando origem ao Rio Claro que corre para oeste-noroeste. O Flanco Leste é o que abrange maior área de bacia hidrográfica, com sulcos que conduzem três rios, na porção setentrional da área há o Rio Azufrado, na meridional o Rio Recio e entre estes o Rio Lagunillas, que posteriormente receberá a carga do Rio Azufrado.

Analizar as características dos sulcos em cada flanco é essencial, já que estas são as partes iniciais e com maior aceleração dos trajetos de possíveis fluxos de massa (Anexo 12). O Flanco Leste apresenta as maiores profundidades médias de sulcos, com o maior valor encontrado sendo de 386 m e com larguras alcançando até quase 600 m, junto das maiores declividades nas laterais íngremes dos sulcos, que alcançam até $69^{\circ}/83^{\circ}$. O Flanco Oeste tem 142 m como maior valor médio encontrado em profundidade, suas larguras são mais variadas e as laterais dos sulcos contém inclinações mais suaves de $51^{\circ}/55^{\circ}$. A maior profundidade média de sulco medida no Flanco Norte foi de 165 m, novamente, há grande variações em suas larguras, a maior parte de sua declividade se encontra abaixo de 41° , com pequenos trechos podendo alcançar declividades de $69^{\circ}/83^{\circ}$.

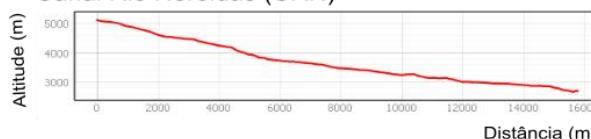
Flanco Oeste



Canal Rio Molinos (CRM)



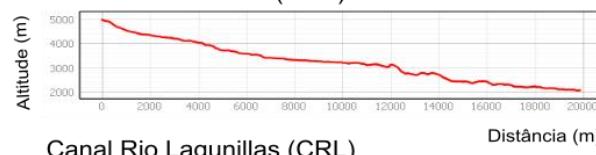
Canal Rio Nereidas (CRN)



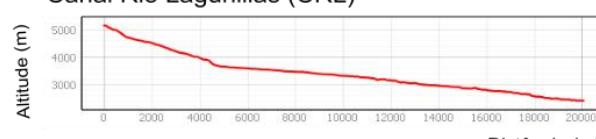
Flanco Leste



Canal Rio Azufrado (CRA)



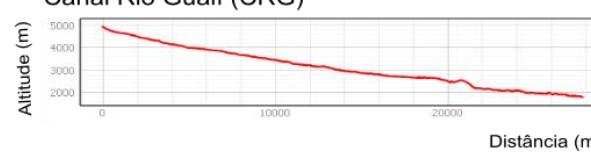
Canal Rio Lagunillas (CRL)



Flanco Norte



Canal Rio Gualí (CRG)



Distância (m)

Figura 34. Projeções 3D dos flancos Norte, Oeste e Leste do Nevado del Ruiz, com destaque aos canais de drenagem na qual passam os rios Molinos, Nereidas, Azufrado, Lagunillas, Recio e Gualí, junto de perfis de elevação dos mesmos. Nas projeções constam as cidades mais próximas do percurso de fluxos de massa e suas distâncias da cratera Arenas.

Todos os sulcos marcados são resultados da intensa ação erosiva atuante na região, ocorrente devido a processos hídricos e glaciais, além da própria erosão causada pelos fluxos de massa que se originam no edifício vulcânico. A concentração de feições mais acentuadas no Flanco Leste do Nevado del Ruiz pode ser atribuída a ocorrência de colapsos parciais do flanco (Thouret et al., 2007; Fig. 35), ligados a passagem da Falha Palestina pelo edifício vulcânico, gerando instabilidades estruturais no local. Além disso, há intensificação de processos erosivos devido a maior área e volume da calota no setor e maior impacto de ventos de direção nordeste, leste e sudeste (Fig. 5), causando erosão eólica.

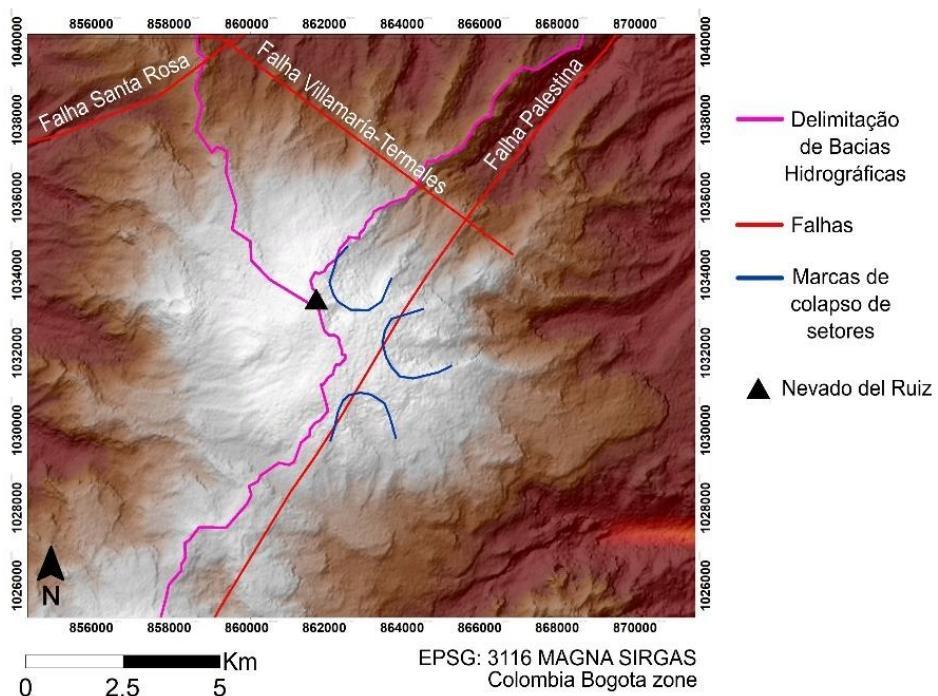


Figura 35. Relação entre colapso de setores e Falha Palestina, onde ela corta o Flanco Leste do edifício, cicatrizes de colapso de setores delimitadas por Thouret et al. (2007).

12.2.2. Deformação do Terreno - InSAR

Os mapas de deformação representam o deslocamento sofrido pela superfície terrestre. Em regiões vulcânicas, pode ser reflexo do comportamento do magma em subsuperfície, ou até mesmo mudanças do relevo por processos superficiais. Com isso, é feita a busca de pontos onde o edifício sofre maior variação de altitude, junto de sua proximidade com áreas de geleira, nas quais serão os focos para a modelagem dos movimentos de massa.

As datas para produção dos mapas de deformação foram selecionadas com base na ocorrência de atividade vulcânica anômala, como aumento de temperatura registrada na cratera Arenas, mudanças de sismicidade coletadas por sismômetros no edifício e até pela maior ejeção de cinzas. Inicialmente, foi consultado o registro destas atividades em boletins extraordinários de atividade do Nevado del Ruiz, emitidos pelo Serviço Geológico Colombiano (SGC), posteriormente, boletins semanais também foram utilizados para seleção de

momentos de normalidade anteriores e posteriores a atividade anômala, para comparação do terreno pré e pós atividade (Anexo 13).

A partir da confecção de diversos mapas de deslocamento da superfície vulcânica, foi verificado que, dentre as datas coletados, o mês de outubro de 2023 foi o que apresentou maior variação de altitude do terreno desde 2015 (Anexo 14). Sendo que, o Boletim Extraordinário de 12/10/2023³¹ informa a ocorrência de grandes anomalias térmicas na cratera Arenas, inclusive uma das mais altas já registradas, além do aumento na sismicidade e na densidade e altura de gases e cinzas. Assim, os mapas produzidos indicam que durante o período de agosto a outubro de 2023 a superfície do edifício sofreu elevação de até 0.65 metros, enquanto entre outubro e novembro ocorreram movimentos de subsidência, com pontos alcançando rebaixamento de mais de 1.00 metro (Fig. 36).

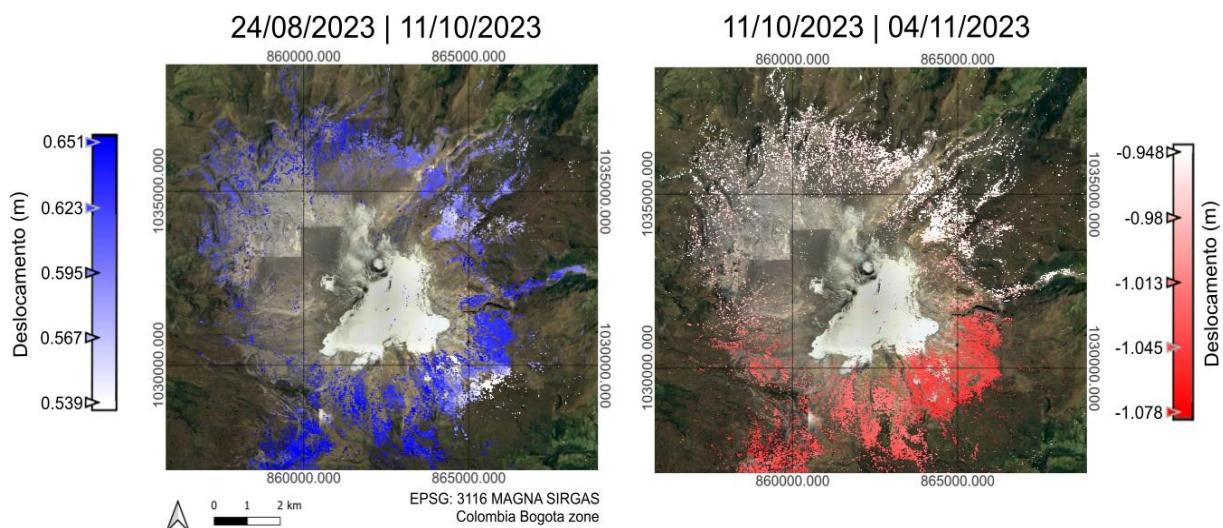


Figura 36. Mapas de deslocamento do vulcão Nevado del Ruiz em relação à atividade anômala de outubro de 2023, entre agosto a outubro ocorrem movimentos de elevação e entre outubro e novembro de rebaixamento.

Em todos os mapas é notável um halo de deformação nos flancos do edifício vulcânico, podendo ser relacionados com as falhas ali presentes, especialmente a Falha Palestina, considerada a principal para canalização de magma atualmente (Londoño e Kumagai, 2018), (Fig. 37). Áreas de cobertura de gelo não apresentam boa coerência de dados, portanto, não é possível retirar informações claras sobre a região da calota, porém, no Flanco Leste, onde a concentração de gelo sempre é historicamente maior em relação às outras direções, há uma maior proximidade da mesma em relação às zonas de deslocamento.

³¹ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_Extraordinario_de_aumento_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_incremento_par%C3%A1metros_12_de_outubro_0345.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

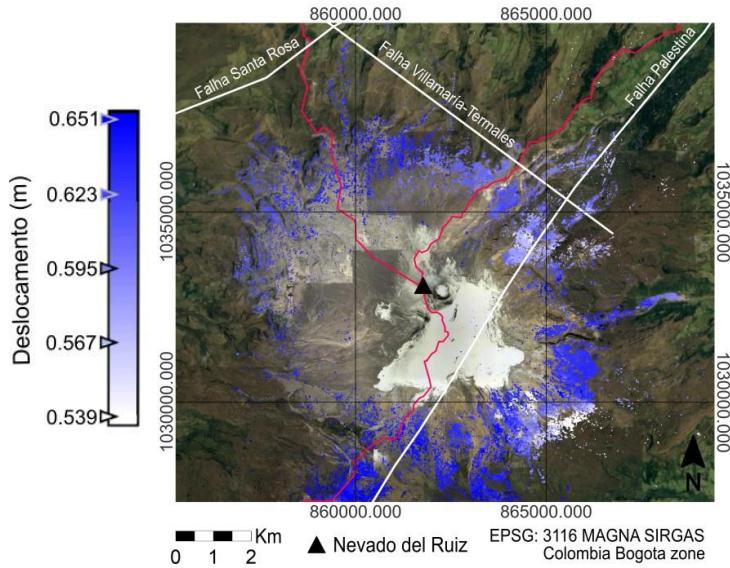


Figura 37. Mapa de deslocamento do vulcão Nevado del Ruiz entre agosto e outubro de 2023, relação entre deslocamento (elevação) e falhas.

12.3. Modelagem

12.3.1. LaharFlow

A modelagem de lahars foi realizada com base na maior área da calota de gelo registrada por sensoriamento remoto multiespectral nos últimos anos, datando de 06/09/2023. Inicialmente, a área total da calota de gelo foi separada para cada flanco, a partir da delimitação das bacias hidrográficas (Flanco Norte, Flanco Leste, Flanco Oeste), então a área de cada flanco foi partilhada em subseções, visando uma melhor distribuição das fontes de reservatório para modelagem do movimento de massa, dado que a ferramenta *LaharFlow* exige a inserção de raios para plotagem das fontes (Fig. 38; Tabela 4), daí a importância da cobertura de todos os locais com presença de gelo. A modelagem de cada flanco é feita separadamente, com as fontes contidas em cada sendo liberadas juntas, de forma a manter a interação entre massa dentro de cada direção de flanco, porém, cobrindo maior terreno, dado o limite espacial do programa.

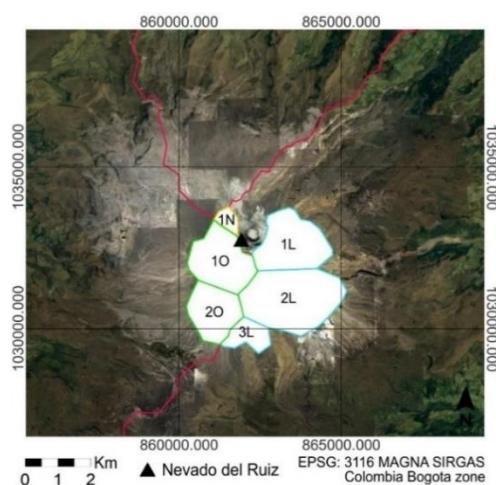


Figura 38. Delimitação de fontes de lahar no edifício Nevado del Ruiz.

Tabela 4. Informações sobre fontes de lahar no edifício vulcânico Nevado del Ruiz (valores inseridos em Add Cap Source, Fig. 24).

Fonte	Posição X	Posição Y	Raio	Espessura	Volume (m ³)	Volume (Km ³)
1N	-75.330°E	4.905°N	400 m	47 m	1.18×10^7	0.0118
1L	-75.307°E	4.889°N	1.000 m	47 m	7.38×10^7	0.0738
2L	-75.308°E	4.874°N	1.270 m	47 m	1.20×10^8	0.12
3L	-75.320°E	4.862°N	560 m	47 m	2.32×10^7	0.0232
1O	-75.333°E	4.886°N	892 m	47 m	5.87×10^7	0.0587
2O	-75.334°E	4.875°N	892 m	47 m	5.87×10^7	0.0587

O volume total da calota de gelo utilizado no presente trabalho é próximo de 3.5×10^8 m³, sendo considerado a partir da delimitação de área da calota, a espessura de 47 metros (Ceballos et al., 2006) e o volume estimado de $5.7 \times 10^8 \pm 2 \times 10^8$ m³ (Thouret et al., 2007), não sendo consideradas outras contribuições para o fluxo ou mesmo a interação do mesmo com água de rios. Os valores são apenas estimativas, sendo a mudança em seu volume compatível com a diminuição da calota com o passar do tempo. Todos os outros parâmetros básicos para definição de características dos fluxos foram mantidos com os valores recomendados pela própria interface da ferramenta (Fig. 23), dada à similaridade entre os diversos resultados obtidos em testes, na qual certas variáveis eram modificadas e outras mantidas.

A duração máxima de tempo indicada para o movimento dos fluxos é de 5 horas, porém, ocorre parada do andamento do movimento de massa antes do tempo pretendido, não chegando a grandes distâncias ao longo do edifício vulcânico e não alcançando cidades próximas, o que mostra a grande proporção do lahar ocorrido em 1985 e como a diminuição de sua calota de gelo impactaria uma menor área em caso de lahars nestas condições (Fig. 39). Ainda é visto que mesmo havendo separação de fontes por direção de flanco no vulcão pode ocorrer incremento de massa em outro flanco, sendo mais difícil separar seu trajeto nos pontos iniciais do fluxo.

É importante ressaltar que o modelo do LaharFlow não é tão robusto quanto outros programas de modelagem, oferecendo uma interface mais simples para processamento dos dados, de forma que pode haver interferências na duração de seu trajeto.

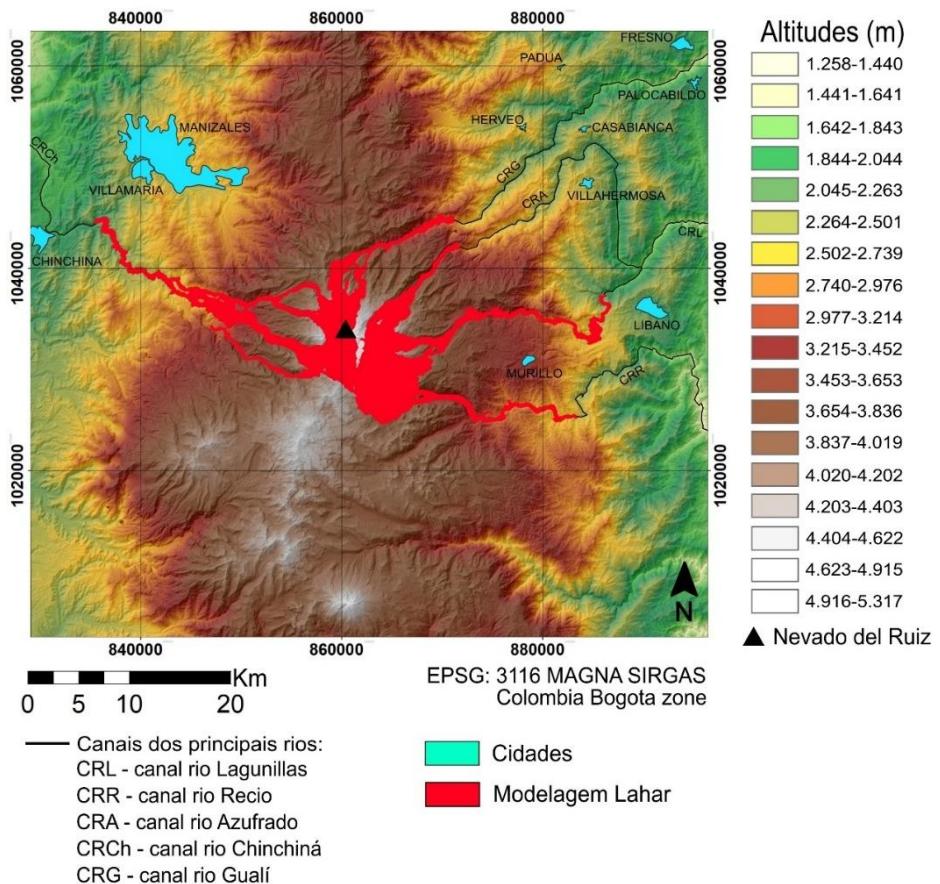


Figura 39. Modelagem de lahar do vulcão Nevado del Ruiz em relação a cidades próximas.

Na mesma ferramenta foram realizadas modelagens de fluxos de lava, onde seus parâmetros são simplificados devido à complexidade de modelar ejeções de magmas félscicos, que seriam menos fluídos e poderiam ser expulsos da cratera como projéteis, sendo assim considerada uma composição máfica mais fluída.

A fonte de liberação de lava é definida na cratera Arenas, única área em que material vulcânico é produzido (Fig. 29). Como não há uma classificação para quantidades de lava expelidas durante erupções vulcânicas, variados volumes de lava foram simulados (Tabela 5; Fig. 40). De $1.06 \times 10^7 \text{ m}^3$ a valores mais baixos o único setor afetado é o Flanco Leste, ocorrendo maior incremento em volume outros setores passam a ser afetados, em $1.41 \times 10^7 \text{ m}^3$, altitudes mais elevadas do Flanco Oeste passam a ser atingidos e o Flanco Norte passa a ser impactado com $1.76 \times 10^7 \text{ m}^3$. Já com volume de $2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ é visto que volumes altos o suficiente pode atingir diversas orientações do edifício vulcânico, com todos os setores sendo altamente impactados.

Tabela 5. Informações sobre fontes de lava no edifício vulcânico Nevado del Ruiz.

Simulação	Posição X	Posição Y	Volume (m^3)	Volume (Km^3)
A	-75.32°E	4.893°N	1.06×10^7	0.0106
B	-75.32°E	4.893°N	1.41×10^7	0.0141
C	-75.32°E	4.893°N	1.76×10^7	0.0176
D	-75.32°E	4.893°N	2.12×10^7	0.0212

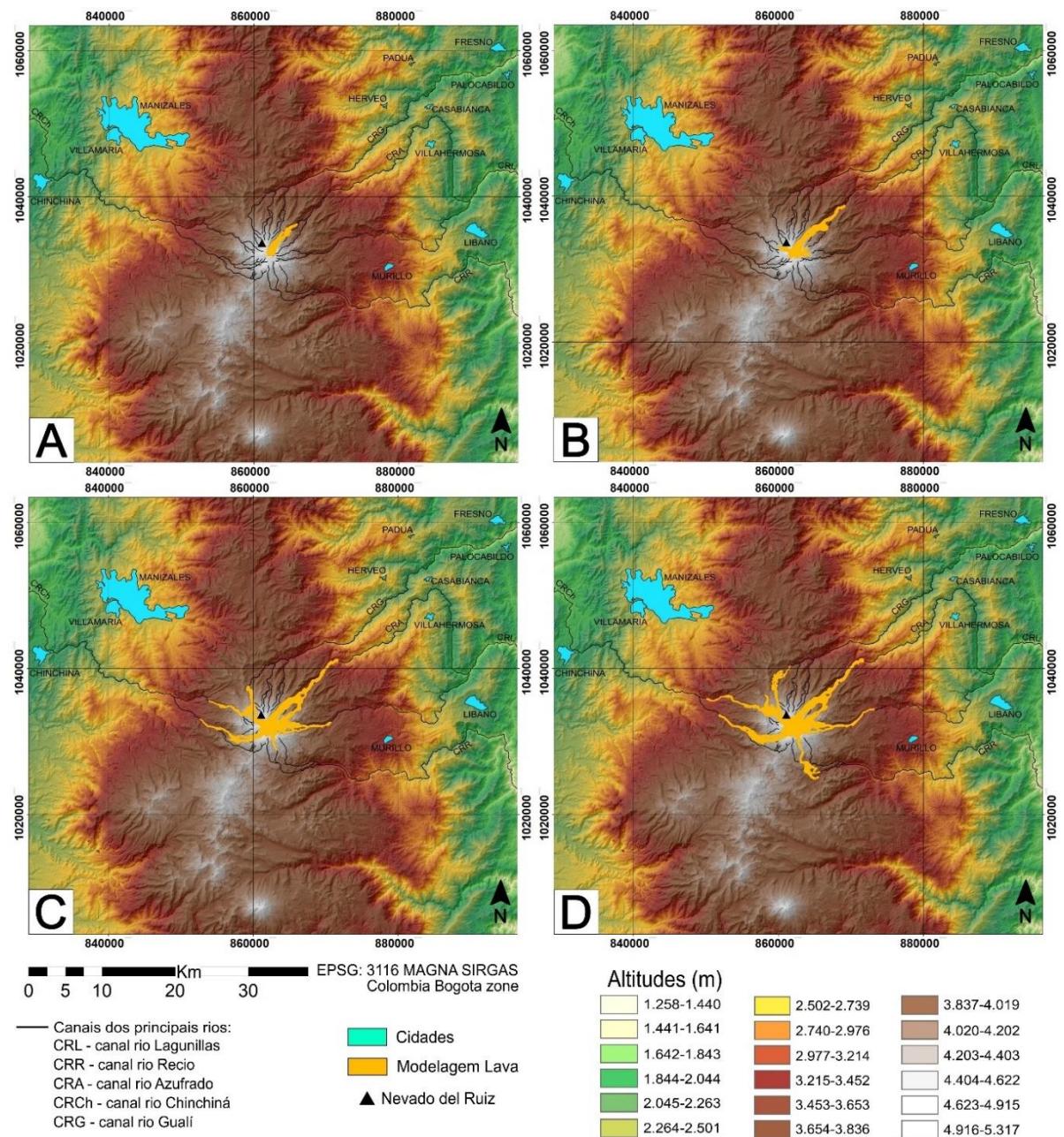


Figura 40. Modelagens de fluxos de lava do vulcão Nevado del Ruiz com relação a diferentes valores de volume.

12.3.2. Ash3D

As simulações realizadas a partir do Ash3D se basearam em erupções de diferentes magnitudes, sendo determinadas por volumes de material ejetado na atmosfera e altura de coluna eruptiva. Os valores escolhidos para simulações foram baseados nos índices de explosividade vulcânica (VEI) de 2 a 5 (Fig. 14), sendo que os índices 0, 1, 6, 7 e 8+ não puderam ser simulados, devido aos valores de mínimo e máximo exigidos pela ferramenta para que a simulação possa ser realizada. Assim, é possível analisar o comportamento das cinzas em dispersão na atmosfera e sua deposição no solo, permitindo avaliar as diferentes áreas a serem potencialmente atingidas em dimensões variadas.

O comportamento das cinzas na atmosfera será controlado pelos ventos atuantes na área, a região do Nevado del Ruiz sofre variações nessas condições ao longo do ano (Fig. 5). Assim, para a escolha de uma data que contemplasse de melhor forma as condições climáticas, foi escolhido o dia 18/07/2024, sendo que em simulações realizadas ao longo do ano, o mês de julho foi o que apresentou maior área afetada, devido a direção e velocidade dos ventos. Além dos dados de coluna eruptiva e volume de material utilizados (Tabela 6), valores padrões do Ash3D foram aplicados para duração de erupção, sendo de 12 horas e simulação de dispersão e deposição, de 24 horas.

Tabela 6. Dados de altura de coluna eruptiva e volume de material ejetado utilizados em simulações de dispersão e deposição de cinzas. Baseados em valores de VEI, simulação A corresponde a VEI 2, B corresponde a VEI 3, C corresponde a VEI 4 e D corresponde a VEI 5.

Simulação	Volume de material ejetado		Altura da coluna eruptiva (km acima do nível do mar)
	(m ³)	(km ³)	
A	1×10^7	0.01	10.32
B	1×10^8	0.1	20.32
C	1×10^9	1	30.32
D	1×10^{10}	10	40.00

Todas as simulações de dispersão de cinzas na atmosfera apresentam compatibilidade com os ventos predominantes que atingem a região da cratera Arenas nas direções nordeste, leste e sudeste, de forma que as cinzas sejam transportadas para norte, noroeste, oeste, sudoeste e sul com grande variação em relação à altura em que chegam alcançar na atmosfera (Fig. 41). As simulações são produzidas a partir de dados meteorológicos coletados na hora escolhida para a simulação, de forma que podem ocorrer mudanças de acordo com variações locais em diferentes datas.

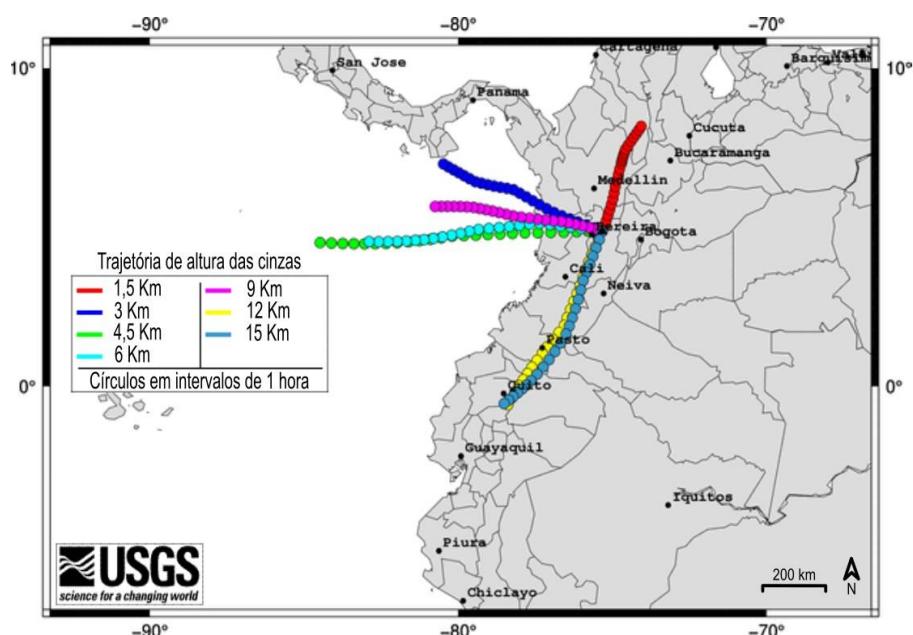
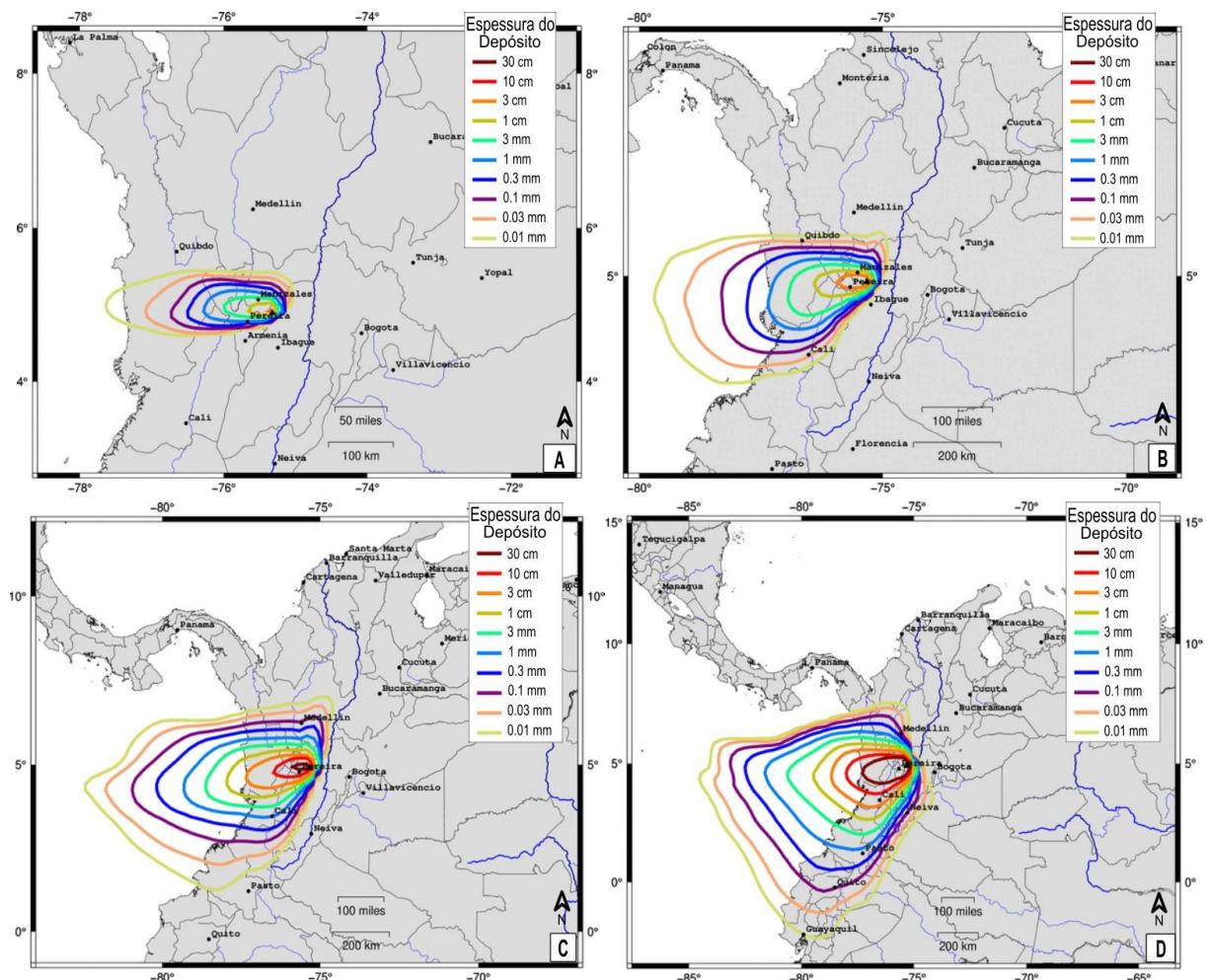


Figura 41. Mapa com dispersão de cinzas contemplando todas as simulações, mostrando a altura em que alcançam na atmosfera, círculos representam intervalos de uma hora, traduzido dos resultados obtidos através do Ash3D, pés transformados em quilômetros.

O depósito de cinzas produzido após sua dispersão e deposição tem grandes variações de acordo com cada simulação. Todos são novamente compatíveis com a região de dispersão devido aos ventos que atingem a área, mas devido ao crescimento de volume do material ejetado e seu alcance na atmosfera as áreas impactadas crescem, assim como a espessura dos depósitos formados pelas cinzas vulcânicas.

As simulações com menor volume de material ejetado (Fig. 42 A e B) apresentam depósitos com espessura máxima de 3 cm, estando concentrado nas proximidades da Cratera Arenas, além de ser visível como a altura da coluna eruptiva auxilia na dispersão de cinzas na atmosfera já que de 10,32 para 20,32 Km a espessura de 0,01 mm de cinzas passam a atingir áreas muito mais distantes.



Não é uma previsão oficial



Esta previsão foi gerada usando o modelo de trajetória do USGS. Incertezas no modelo significam que cinzas perceptíveis podem ocorrer fora da área de previsão. Portanto, os resultados do modelo devem ser considerados como um guia geral para áreas impactadas, em vez de um preditor de quantidades como espessura de depósito ou concentração de cinzas e nuvens em um determinado local. Para mais informações, entre em contato com ash3d-info@usgs.gov.

Figura 42. Mapa com espessuras dos depósitos de cinzas para cada simulação realizada, traduzido dos resultados obtidos através do Ash3D. Simulação A corresponde a VEI 2, B corresponde a VEI 3, C corresponde a VEI 4 e D corresponde a VEI 5.

Ao aumentar o volume de material ejetado e a altura da coluna eruptiva, uma distância muito maior passa a ser alcançada, enquanto depósitos formados podem alcançar 30 cm de

espessura em áreas próximas ao edifício vulcânico (Fig. 42 C). A maior mudança ocorre na última simulação (Fig. 42 D), onde a espessura máxima é novamente de 30 cm, porém, as áreas atingidas com essa espessura alcançam mais de 200 Km de distância da cratera, alcançando a região litorânea do país. Como os valores escolhidos para realização de modelagens são compatíveis com valores de VEI é possível observar como a magnitude de erupção aumenta de acordo com o volume de material ejetado.

13. MAPA DE PERIGOS VULCÂNICOS E CONCLUSÕES

Através do estudo várias relações puderam ser estabelecidas entre a geomorfologia do edifício vulcânico e processos ocorrentes no mesmo, sendo possível realizar modificações no mapa de ameaças vulcânicas do Nevado del Ruiz por meio de sensoriamento remoto (Fig. 43), onde os mesmos foram avaliados mesmo estando a distância, a partir disto, já podem ser atribuídas diferenças na análise, além de mudanças na geomorfologia e na robustez dos programas utilizados em cada modelagem. As modelagens para confecção do mapa se basearam na mobilização do volume total da área da calota de gelo ($3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$), volume de lava capaz de atingir todos os flancos do edifício vulcânico ($2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$) e quantidades de cinzas vulcânicas compatíveis com erupções vulcânicas de VEI 3 ($1 \times 10^8 \text{ m}^3$).

A partir dos estudos e subsequente modificações no mapa de ameaças oficial do SGC (2015) é possível observar que:

(I) Devido a diferenças expressivas de volume da calota de gelo, foi modelada uma menor área a ser impactada por lahars em relação ao mapa oficial do SGC (2015) e de proporções menores se comparado a erupção de 1985. O fluxo de lahar continua ocorrendo em todas as direções de flancos do Nevado del Ruiz, apesar da grande dispersão, não há contato com as cidades no mapa. No Flanco Oeste o lahar atinge os canais do rio Molinos e Nereidas até alcançar o rio Claro, parando próximo de Chinchina, no Flanco Leste o lahar chega próximo a Murillo ao passar pelos canais do rio Recio e Lagunillas, com o último também se aproximando de Libano, o canal do rio Azufrado tem a parada do lahar mais distante de cidades, sendo Villahermosa e Casabianca as de maior proximidade, lahars no Flanco Norte também cessam em áreas mais distantes de cidades, com Casabianca e Herveo mais perto.

Mapa de perigos - Vulcão Nevado del Ruiz

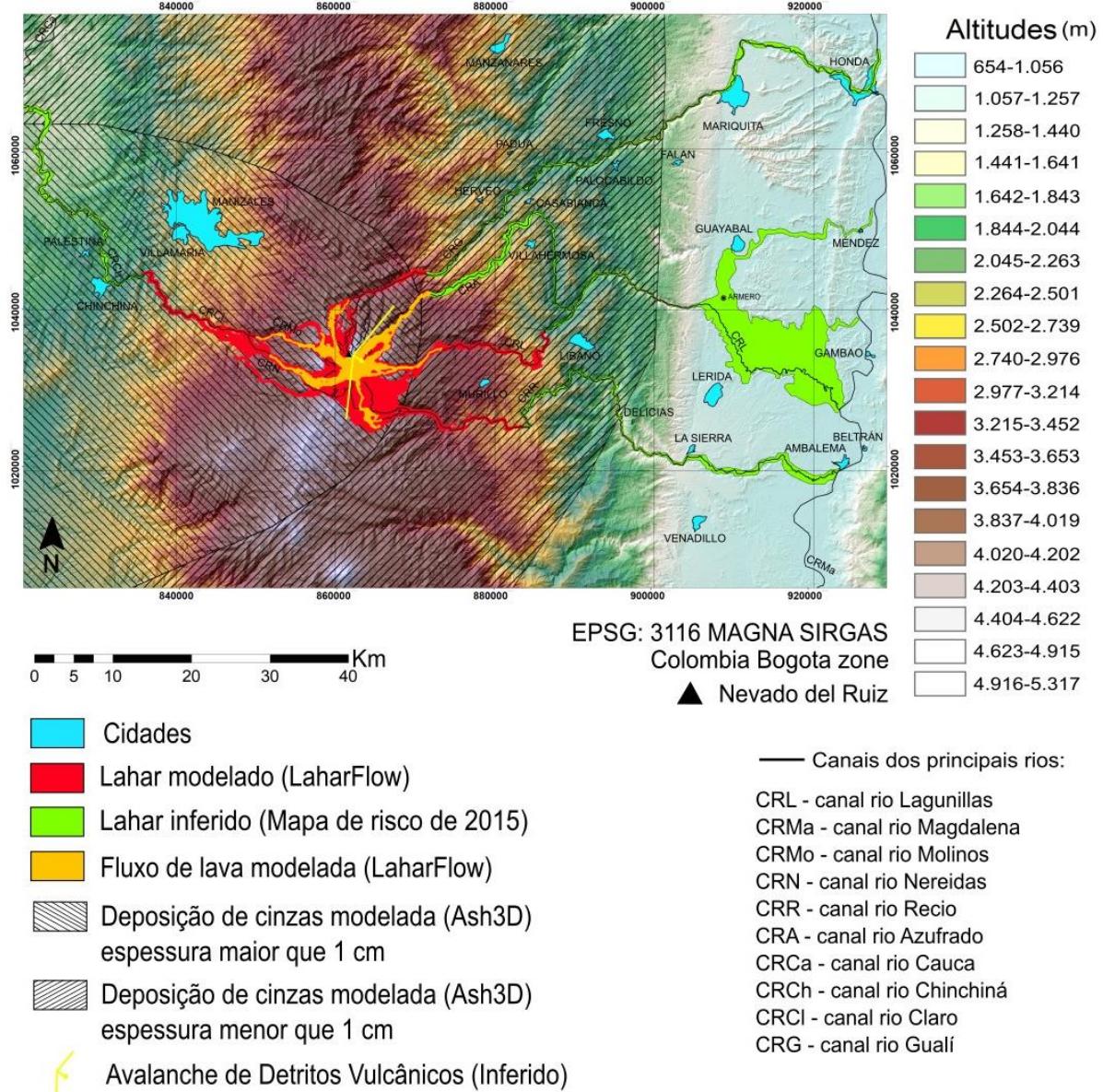


Figura 43. Mapa de perigos do vulcão Nevado del Ruiz, contendo delimitações sobre trajeto de lahars, lava, cinzas vulcânicas e avalanches de detritos, baseado em VEI 3.

(II) Os fluxos de lava são apresentados de forma diferentes, considerando que vários parâmetros e características da lava foram simplificados para se aplicarem a ferramenta de modelagem e um grande volume foi simulado para determinar quais setores poderiam ser atingidos. Porém, mesmo com grandes volumes, estes se mantêm nos flancos do edifício.

(III) As avalanches de detritos apresentaram modificações, sendo inferidas com base na passagem de falhas pelo edifício vulcânico e locais mais propícios para processos de intensa erosão. Não foram feitas simulação acerca do processo, portanto, um alcance para sua ocorrência não pode ser definido, mas, inferindo maior susceptibilidade de ocorrência no Flanco Leste, a cidade de Murillo se encontra mais próxima.

(V) A modelagem de cinzas para um VEI 3 apresenta direções semelhantes, compatível com a direção nordeste, leste e sudeste de ventos que atingem o edifício vulcânico, estes são responsáveis pelo transporte e dispersão de cinzas liberadas pelo único ponto onde material vulcânico é liberado, a cratera Arenas, dispersando assim as cinzas para as direções noroeste a sudoeste com maior intensidade. As modelagens mostram que parte do material sofre deposição, principalmente em regiões próximas do vulcão, nas cidades Manizales, Villamaria, Chinchina e Palestina, onde há indicação de depósitos que podem atingir espessuras maiores que 1 cm, as cidades Manzanares, Fresno, Padua, Herveo, Palocalbito, Casabianca, Villahermosa, Libano e Murillo também podem abrigar depósitos, porém, com espessuras menores que 1 cm. Parte do material ainda continuará em suspensão na atmosfera, atingindo maiores altitudes e percorrendo maiores distâncias.

É importante ressaltar que na presente modelagem de lahar, a interação do fluxo com a vazão dos próprios rios na qual ele é propagado não é considerada, sendo esta uma condição muito importante para a propagação do mesmo. Portanto, isso acarreta em impactos nas áreas modeladas, de forma que os fluxos gerados pelo vulcão Nevado del Ruiz possam alcançar regiões mais distantes, que tenham proximidade com estes rios. Assim, em futuros trabalho, surge a necessidade da adição destes dados, para que, de fato, uma análise mais robusta e que considere todas as condicionantes possa ser realizada.

Os fluxos de lava também foram simulados de forma mais simplificada, sendo necessárias modelagens mais completas e com o acréscimo de projéteis balísticos em softwares adequados. De forma que o cenário mais real possível possa ser inferido e assim, gerar um mapa de perigos completo para o vulcão.

Junto disso, há diferenças de modelagem para cada software que possa ser utilizado, retratando os diferentes parâmetros a serem considerados, os diferentes cálculos a serem realizados e até os diferentes valores utilizados em cada simulação. Desta forma, seria muito importante a comparação dos diversos resultados possíveis de serem obtidos, para que possam ser complementados em um único produto.

Além das modelagens, é visto que devido ao grande potencial de impacto que vulcões podem causar, de acordo com a magnitude de sua erupção é de extrema importância o seu monitoramento constante, visando identificar alterações no edifício vulcânico que possam indicar processos de perigos vulcânicos. Junto do monitoramento terrestre, o sensoriamento remoto se mostra uma eficaz ferramenta complementar para o monitoramento a distância, como apresentado no presente trabalho, permitindo a realização de diversas análises temporais e o estabelecimento de relações entre o terreno e os perigos vulcânicos que podem ocorrer.

Assim, como o último mapa de ameaças oficial do vulcão Nevado del Ruiz data de 2015, os resultados aqui obtidos servem de base para, com a adição de novas modelagens

que considerem os parâmetros ditos anteriormente, seja feita a integração com dados geofísicos e geotécnicos locais, além de dados da análise de exposição, situação de vulnerabilidade e resiliência das cidades próximas, possa ser produzido um robusto mapa de riscos atualizado do vulcão Nevado del Ruiz.

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, P., Adam, L., Lamessa, G., 2020, B-Value Mapping for Volcanic-Related Geothermal System: A Case Study of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, In Proceedings 42nd New Zealand Geothermal Workshop, v. 24, p. 26.

Alencar, B.P.B., 2013, Análise de áreas de sombras em imagens alos/palsar, Recife, Dissertação, Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, p. 69.

Bachri, S., Irawan, L. Y., Wirawan, R., Nurjanah, A. E., Tyas, L. W. N., Utaya, S., 2019, Dynamics of Lahar Material Deposition Post 2014 Kelud Eruption of Bladak River, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, v. 256, no. 1, doi:10.1088/1755-1315/256/1/012021

Barberi, F., Martini, M., & Rosi, M., 1990, Nevado del Ruiz volcano (Colombia): pre-eruption observations and the November 13, 1985 catastrophic event, *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 42, no. 1-2, p. 1-12, doi:10.1016/0377-0273(90)90066-O.

Blackett, M., 2017, An overview of infrared remote sensing of volcanic activity: *Journal of Imaging*, v. 3, no. 2, p. 13, doi:10.3390/jimaging3020013.

Bohórquez, O.P., Monsalve, M.L., Velandia, F., Gil, F., Mora, H., 2005, Marco tectónico de la cadena volcánica más septentrional de la cordillera Central de Colombia: *Boletín de Geología*, v. 27, no. 1, p. 55–79.

Borrero, C., Toro, L. M., Alvarán, M., Castillo, H., 2009, Geochemistry and tectonic controls of the effusive activity related with the ancestral Nevado del Ruiz volcano, Colombia: *Geofísica internacional*, v. 48, no. 1, p. 149-169.

Carrasco-Núñez, G., Vallance, J. W., Rose, W. I., 1993, A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: implications for hazard assessment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 59, no. 1-2, p. 35-46, doi:10.1016/0377-0273(93)90076-4.

Castellazzi, P., Schmid, W., 2019, Ground displacements in the Lower Namoi region, Report, CSIRO, Australia.

Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haeberli, W., Machguth, H., 2006, Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia: *Annals of Glaciology*, v. 43, p. 194-201.

Ceballos-Hernández, J. A., Martínez-Tabares, L. M., Valencia-Ramírez, L. G., Pulgarín-Alzate, B. A., Correa-Tamayo, A. M., Narváez-Marulanda, B. L., 2020, Geological evolution of the Nevado del Ruiz Volcanic Complex: The geology of Colombia, v. 4, p. 267-296, doi:10.32685/pub.esp.38.2019.07.

Cervantes, C. A. M., 2019, 3D modelling of faulting and intrusion of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, Doctoral dissertation.

Crosta, A.P, 1993, Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto, IG/UNICAMP, Campinas, SP, 170p.

de Vries, B. V. W., Davies, T., 2015, Landslides, debris avalanches, and volcanic gravitational deformation, In *The encyclopedia of volcanoes*: Academic Press, p. 665-685, doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00038-9.

Dornelles, K. A., 2008, Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA, Campinas, Tese, Doutorado em Engenharia Civil, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

Dufek, J., Ongaro, T. E., Roche, O., 2015, Pyroclastic density currents: processes and models, In *The encyclopedia of volcanoes*: Academic Press, p. 617-629, doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00035-3.

Fagents, S. A., Gregg, T. K., Lopes, R. M., 2013, *Modeling volcanic processes: the physics and mathematics of volcanism*: Cambridge University Press.

Figueiredo, D., 2005, *Conceitos básicos de sensoriamento remoto*, São Paulo.

Fisher, R.V., Schmincke, H.U., 1984, *Pyroclastic rocks*: Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, p. 472, doi:10.1007/978-3-642-74864-6.

Florenzano, T. G., 2007, *Iniciação em sensoriamento remoto: Oficina de Textos*.

González-Garcia, J., Hauser, J., Annetts, D., Franco, J., Vallejo, E., Regenauer-Lieb, K., 2015, Nevado Del Ruiz Volcano (Colombia): a 3D model combining geological and geophysical information: In *World Geothermal Congress*, IGA, Melbourne, p. 11.

González-Garcia, J., Jessell, M., 2016, A 3D geological model for the Ruiz-Tolima Volcanic Massif (Colombia): Assessment of geological uncertainty using a stochastic approach based on Bézier curve design: *Tectonophysics*, v. 687, p. 139-157, doi:10.1016/j.tecto.2016.09.011.

Grosse, P., Danišík, M., Apaza, F. D., Guzmán, S. R., Lahitte, P., Quidelleur, Bachmann, O., 2022, Holocene collapse of Socompa volcano and pre-and post-collapse growth rates constrained by multi-system geochronology: *Bulletin of Volcanology*, v. 84, no. 9, p. 85, doi:10.1007/s00445-022-01594-0.

Hall, M. L., 1990, Chronology of the principal scientific and governmental actions leading up to the November 13, 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 42, no. 1-2, p. 101-115, doi:10.1016/0377-0273(90)90072-N.

Hall, M. L., 1992, The 1985 Nevado del Ruiz eruption: scientific, social, and governmental response and interaction before the event, In *Geohazards: Natural and man-made*, Dordrecht: Springer Netherlands, p. 43-52, doi:10.1007/978-94-009-0381-4_6.

Hughes, A., Kendrick, J. E., Salas, G., Wallace, P. A., Legros, F., Di Toro, G., Lavallée, Y., 2020, Shear localisation, strain partitioning and frictional melting in a debris avalanche generated by volcanic flank collapse: *Journal of Structural Geology*, v. 140, doi:10.1016/j.jsg.2020.104132.

Hürlimann, M., Garcia-Piera, J. O., Ledesma, A., 2000, Causes and mobility of large volcanic landslides: application to Tenerife, Canary Islands: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 103, no. 1-4, p. 121-134, doi:10.1016/S0377-0273(00)00219-5.

Ioan, S., Alexandru, S., Viorel, M., Zoltán, P., Péter, L., 2023, Volcanic debris avalanche deposits and their significance in the architecture and evolution of the Miocene-Quaternary Călimani-Gurghiu-Harghita volcanic range (Eastern Transylvania, Romania): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 443, doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107932.

Lavigne, F., Thouret, J. C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A., 2000, Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview: *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 100, no. 1-4, p. 423-456, doi:10.1016/S0377-0273(00)00150-5.

Londoño, J. M., Kumagai, H., 2018, 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 358, p. 105-123, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015.

Londoño, J. M., Sudo, Y., 2001, Spectral characteristics of volcano-tectonic earthquake swarms in Nevado del Ruiz Volcano, Colombia: *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 112, no. 1-4, p. 37-52, doi:10.1016/S0377-0273(01)00233-5.

Londoño, J. M., Sudo, Y., 2003, Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 119, no. 1-4, p. 61-87, doi:10.1016/S0377-0273(02)00306-2.

Lundgren, P., Samsonov, S. V., López Velez, C. M., Ordoñez, M., 2015, Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations: *Geophysical Research Letters*, v. 42, no. 12, 4816-4823, doi:10.1002/2015GL063858.

Makris, S., Roverato, M., Lomoschitz, A., Cole, P., Manzella, I., 2023, The propagation and emplacement mechanisms of the Tenteniguada volcanic debris avalanche (Gran Canaria): Field evidence for brittle fault-accommodated spreading: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 435, doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107773.

Mejía Toro, E. L., 2012, Características cinemáticas y condiciones de deformación de un segmento de la Falla Palestina al NE del volcán Nevado del Ruiz, Tesis, maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.

Muñoz, F. C., Nieto, A. E., Meyer, H., 1990, Analysis of swarms of high-frequency seismic events at Nevado del Ruiz volcano, Colombia (January 1986–August 1987): development of a procedure: *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 41, no. 1-4, p. 327-354, doi:10.1016/0377-0273(90)90095-W.

Nievinski, F. G., 2004, Interferometria por radar de abertura sintética, Monografia, Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, p. 87.

Ordonez, M., Laverde, C., Battaglia, M., 2022, The new lava dome growth of Nevado del Ruiz (2015–2021): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 430, doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107626

Orozco, O. L. P., Escobar, Y. C., 2008, Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer: *Ingeniería y Desarrollo*, no. 23, p. 104-118.

Parfitt, L., Wilson, L., 2009, Fundamentals of physical volcanology: Blackwell, Oxford.

Pérez, C. S., Bejarano, E. G. S., Castro, D. F. C., Alcarcel, J. C. M., Upegui, E. S., 2019, Análisis histórico del retroceso glaciar en el nevado del Ruiz considerando el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur: *UD y la geomática*, no. 14.

Scarpa, R., Tilling, R. I., & Voight, B., 1996, The management of volcano emergencies: Nevado del Ruiz, *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, p. 719-769, doi:10.1007/978-3-642-80087-0_22.

Servicio Geológico Colombiano, 2015, Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Nevado del Ruiz. Escala 1:120000. Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Documents/Mapa_de_Amenaza-VNR_v3-2015.pdf. Acesso em: 12/06/2023.

Siebert, L., Roverato, M., 2021, A historical perspective on lateral collapse and Debris Avalanches, *Volcanic Debris Avalanches: From Collapse to Hazard: Advances in Volcanology*, Springer, p. 11–51, doi:10.1007/978-3-030-57411-6_2.

Richter, N., Froger, J. L., 2020, The role of Interferometric Synthetic Aperture Radar in detecting, mapping, monitoring, and modelling the volcanic activity of Piton de la Fournaise, La Réunion: A review: *Remote Sensing*, v. 12, no. 6, p. 1019.

Pyle, D. M., Mather, T. A., Biggs, J., 2013, Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling—introduction: *Geological Society, London, Special Publications*, v. 380, no.1, p.1-13.

Roig, N., Cappello, A., Ferrucci, F., 2019, Role of emissivity in lava flow ‘Distance-to-Run’ estimates from satellite-based volcano monitoring: *Remote Sensing*, v. 11, no. 6, p. 662.

Thouret, J. C., Gibert-Malengreau, B., Vargas, C. A., Naranjo, J. L., Vandemeulebrouck, J., Valla, F., Funk, M., 2007, Volcano–glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study: *Annals of Glaciology*, v. 45, no. 1, p. 115-127, doi:10.3189/172756407782282589.

Toro, R. A., Osorio, J. A., 2005, Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de Los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores: *Boletín de Geología*, v. 27, no. 1, p.13-24.

Vargas, C. A., Koulakov, I., Jaupart, C., Gladkov, V., Gomez, E., El Khrepy, S., Al-Arifi, N., 2017, Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography: *Scientific Reports*, v. 7, no. 1, doi:10.1038/srep46094.

Voight, B., 1990, The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection, *Journal of volcanology and geothermal research*, v. 44, no. 3-4, p. 349-386, doi:10.1016/0377-0273(90)90027-D.

15. ANEXOS

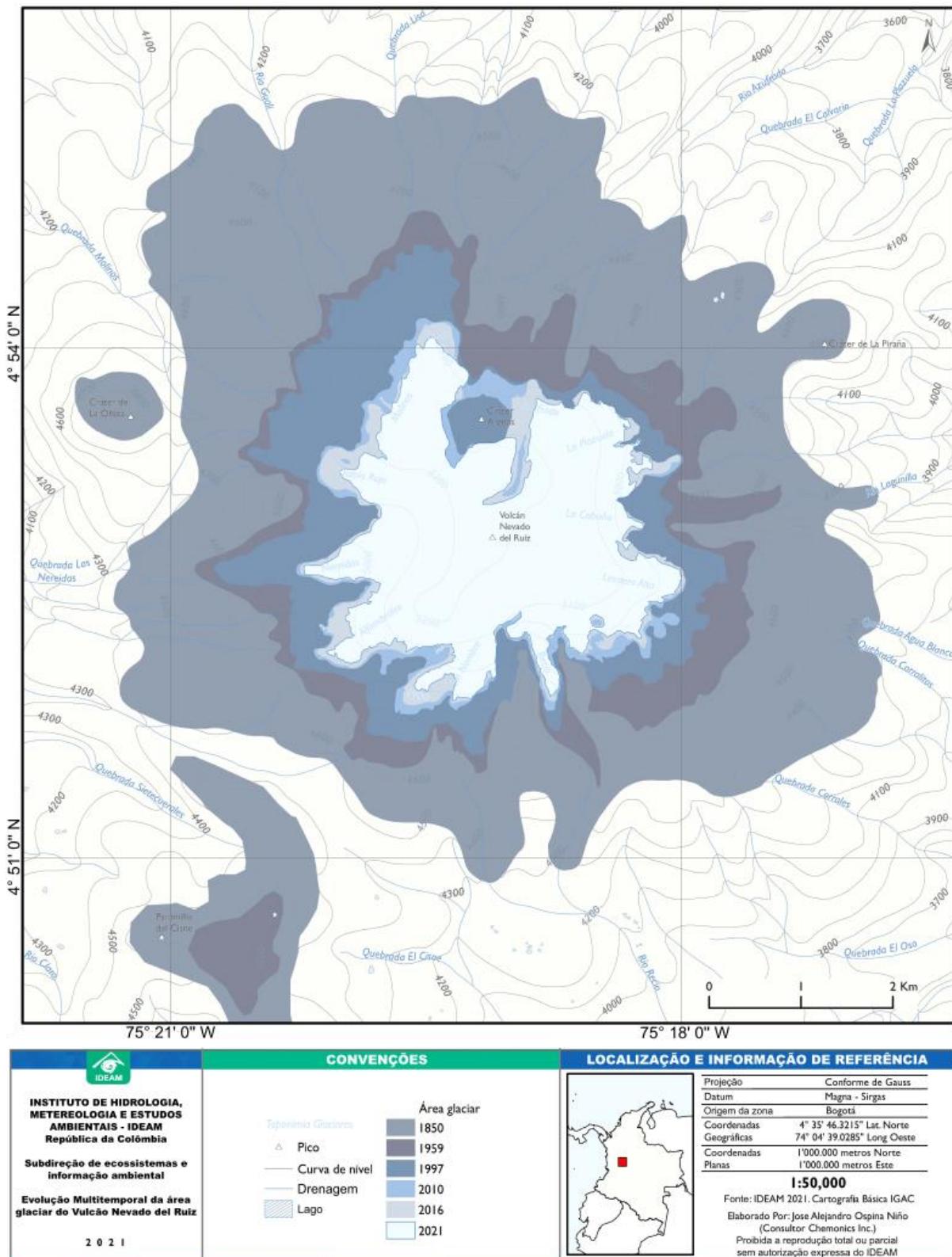
ANEXO 1 - (a) Foto da cratera Arenas de 08/03/2012 (extraído de Servicio Geológico Colombiano³²); (b) Cratera Arenas em 29/01/2021, imagem sobreposta mostra cúpula em crescimento (extraído de Smithsonian Institution, 2021³³).



³² Disponível em: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/Galeria-de-im%C3%A1genes.aspx#>. Acesso em: 01/02/2024.

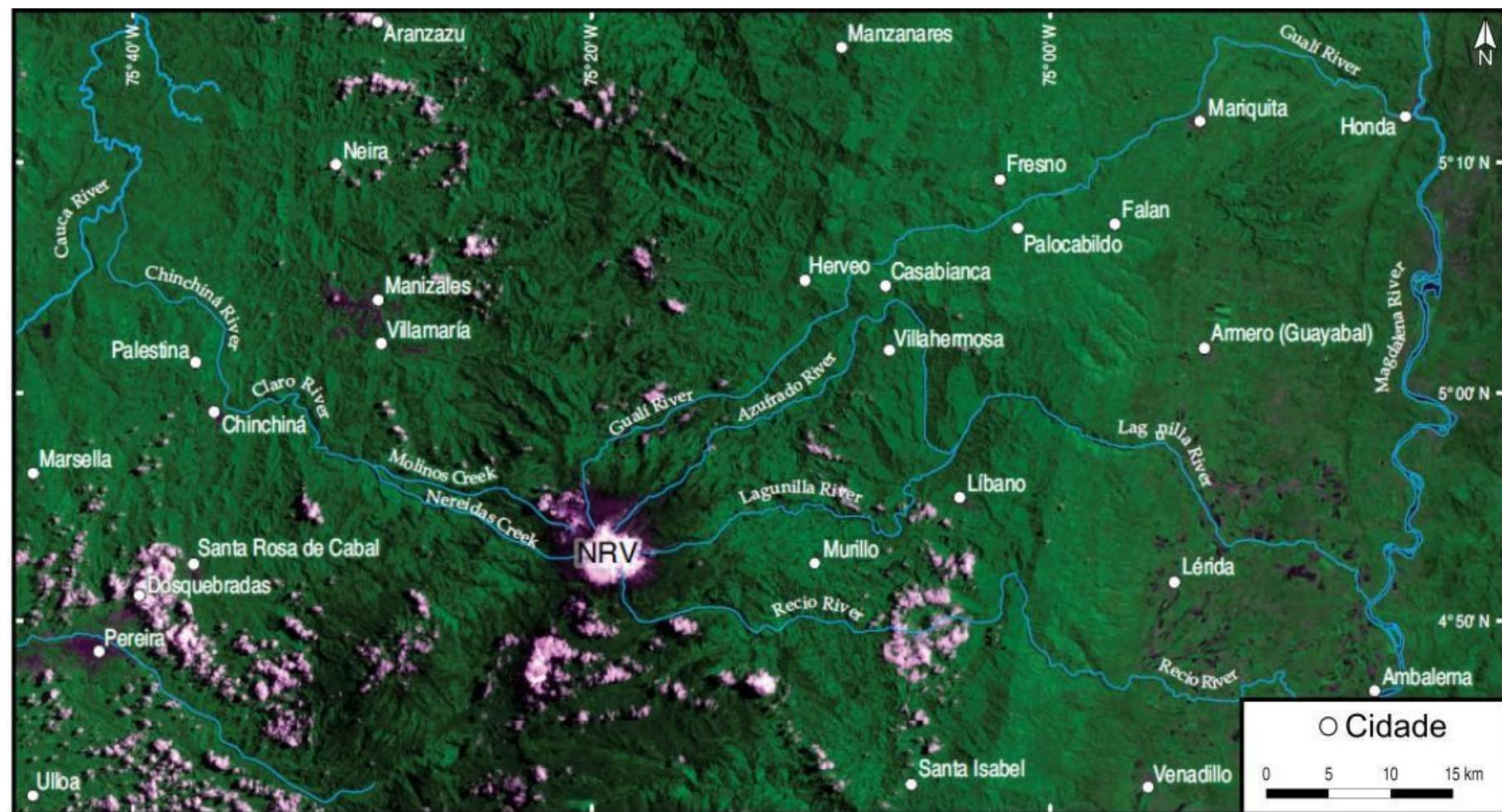
³³ Global Volcanism Program, 2021. Report on Nevado del Ruiz (Colombia) (Crafford, A.E., and Venzke, E., eds.). Bulletin of the Global Volcanism Network, 46:6. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN202106-351020>

ANEXO 2 - Variações da área da calota do Nevado del Ruiz (IDEAM, 2021³⁴).

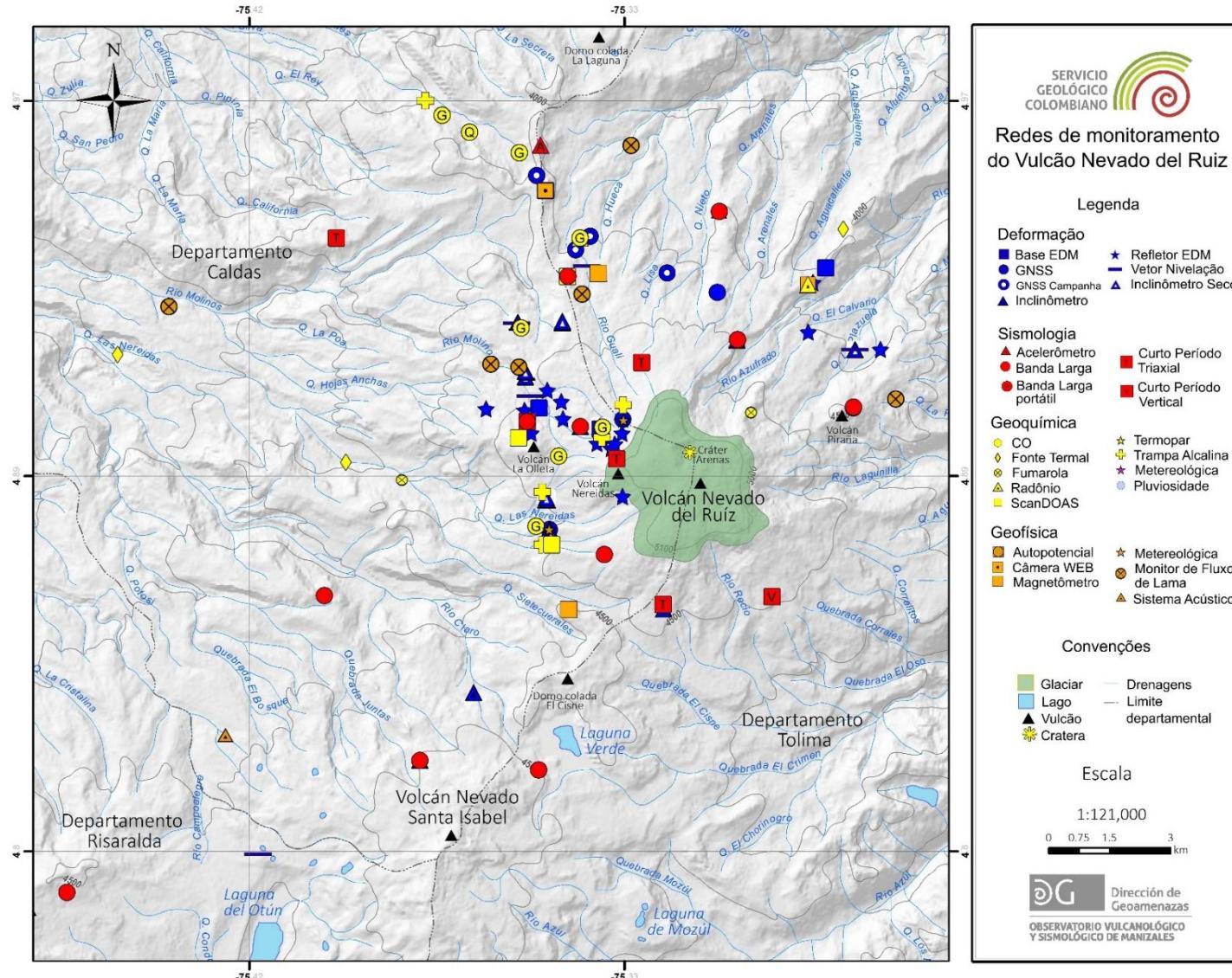


³⁴ Disponível em: <https://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>. Acesso em: 29/04/2024.

ANEXO 3 - Rios com nascente no vulcão Nevado del Ruiz (NRV, na imagem) e principais cursos d'água da área (Rio Magdalena e Rio Cauca), junto de cidades presentes em seu entorno (extraído de Ceballos-Hernández et al., 2020).



ANEXO 4 - Redes de monitoramento do vulcão Nevado del Ruiz (Serviço Geológico Colombiano, 2023³⁵).



³⁵ Disponível em: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/Redes-de-monitoreo.aspx>. Acesso em: 10/05/2024.

ANEXO 5 - Esquema de estados de alerta para atividade vulcânica na Colômbia, a partir de 14 de setembro de 2023 (Servicio Geológico Colombiano, 2023³⁶).

Estado	Descrição técnica	Recomendações gerais para autoridades e comunidade
 Alerta Verde Vulcão ativo em repouso	<p>Vulcão com pequenas alterações sem ultrapassar o limite base dos parâmetros monitorados (sismicidade, deformação da superfície vulcânica, geoquímica, atividade superficial).</p> <p>Manifestações superficiais: baixos níveis de desgaseificação passiva na cratera e nas fumarolas, atividade fumarólica e odores, presença de fontes termais, entre outras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Adquirir conhecimento do vulcão. • Iniciar educação de emergência e planos comunitários. • Identificar rotas de evacuação e pontos de encontro de acordo com o mapa de ameaças. • Participe de exercícios.
 Alerta Amarelo Vulcão ativo com alterações no comportamento do nível base dos parâmetros monitorados e outras manifestações	<p>Os diferentes parâmetros monitorizados apresentam alterações que podem incluir: sismicidade com níveis moderados, enxames sísmicos, aumentos de sismicidade devido à fraturação de rochas e ocorrência de sismicidade associada à dinâmica de fluidos; deformação leve a moderada; níveis moderados de liberação de gases e alterações nos parâmetros físico-químicos de fontes termais e fumarolas; aumento da altura e densidade da coluna de vapor d'água e gases.</p> <p>Manifestações superficiais: podem ocorrer emissões esporádicas de cinzas (pequenas erupções), cujo alcance e efeitos são restritos, sendo que a dispersão das cinzas depende da direção do vento; presença de alguma incandescência; pequenas explosões na cratera; anomalias térmicas de baixa energia; ruídos; terremotos; cheiros; precipitação de enxofre elementar nas proximidades da cratera e em fontes termais e fumarolas; e desgaseificação em outras áreas além da cratera.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver e implementar instrumentos de planejamento. • Fortalecer processos de apropriação do conhecimento geocientífico. • Elaborar, atualizar ou rever planos e estratégias de resposta departamentais e municipais, bem como planos específicos e de resposta. • Realizar simulações e exercícios para possíveis eventos eruptivos. • Restringir o acesso à parte superior do vulcão (depende do vulcão). • Participe de exercícios.
 Alerta Laranja Vulcão com alterações	<p>Todos ou vários dos parâmetros monitorizados apresentam alterações importantes, acima do nível de base de atividade, que incluem: sismicidade com níveis moderados a elevados que podem estar associados à dinâmica dos fluidos ou sismicidade associada à fratura de rochas no interior do vulcão; considerável deformação superficial; alterações significativas nos níveis de</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Definir áreas de possível evacuação preventiva, imediata e de exclusão, dependendo do vulcão e de acordo com o estabelecido no mapa de ameaça vulcânica e nos planos. • Implementar medidas de proteção pessoal.

³⁶ Disponível em: [https://srvags.sgc.gov.co/PortalWeb/Hoja-Informativa-esquema-medicion-actividad-volcanica-SGC-\(14-09-2023\).pdf](https://srvags.sgc.gov.co/PortalWeb/Hoja-Informativa-esquema-medicion-actividad-volcanica-SGC-(14-09-2023).pdf). Acesso em: 10/05/2024.

<p>importantes nos parâmetros monitorados</p>	<p>desgaseificação (aumento ou diminuição drástica na frequência de emissões de SO₂ ou outros gases magmáticos); aumento nas alturas da coluna de vapor d'água e gases.</p> <p>Manifestações superficiais em que podem ocorrer alguns destes fenómenos: emissões frequentes de cinzas (pequenas erupções) cujo volume não afeta significativamente a vida cotidiana; explosões ou incandescência; anomalias térmicas significativas; ruídos; terremotos; odores fortes e irritantes em áreas próximas ao vulcão; precipitação de enxofre elementar nas proximidades do edifício vulcânico; liberação significativa de gases magmáticos que podem causar a morte de pequenos animais que estejam próximos ao vulcão; rachaduras no chão. Pode ocorrer o surgimento e destruição de cúpulas com alcance limitado de impacto, projéteis balísticos, lahars de pequenos volumes ou correntes de densidade piroclástica restritas à parte proximal do edifício vulcânico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecer processos de apropriação do conhecimento geocientífico. • Realizar exercícios de simulação e exercícios de evacuação. • Fortalecer os processos de comunicação em todos os níveis. • Restringir o acesso a determinados setores do vulcão, dependendo do vulcão e do mapa de ameaças.
 <p>Alerta Vermelho Vulcão em erupção</p>	<p>Erupção maior (considerável) em curso, cujos efeitos podem afetar e colocar em risco a vida das pessoas que vivem em zonas de ameaça vulcânica alta e/ou média, dependendo do fenômeno.</p> <p>As redes de monitoramento podem registrar sinais sísmicos associados a erupções, aumento da sismicidade superficial de sismos de fratura e de fluidos localizados na cratera principalmente, aumento da energia sísmica liberada, deformação coercriva, alta desgasificação, ondas de pressão, ondas de choque, entre outros. Liberação de altos níveis de gases e vapor de água. Pode apresentar fenômenos como aglomeração e destruição de domos, explosões ou colapsos de domo, colapsos de colunas eruptivas, geração de correntes de densidade piroclástica de volumes importantes, formação de novas crateras, lahars de grande extensão e volume, colunas de gases, vapor de água e / ou cinzas altas e muitos equipamentos de gases azufrados e halogenados, presença de tormentas elétricas e raios na zona próxima à cratera, entre outros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ativar planos e estratégias departamentais e municipais. • Realizar a evacuação obrigatória de zonas que possam ser afetadas pela erupção, dependendo do vulcão e do mapa de ameaça. • Restringir o acesso a ravinhas ou rios que nascem no vulcão, e a vias ou setores que podem cruzar o vulcão, ou zonas de perigo que podem ser afetadas pela erupção. • Fortalecer os processos de comunicação em todo o nível.

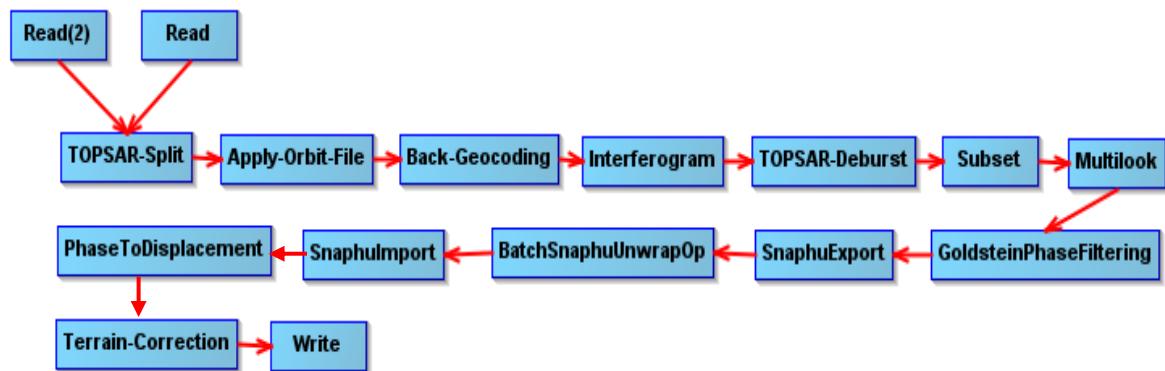
ANEXO 6 - Dados utilizados no sensoriamento remoto passivo (sensoriamento remoto multiespectral e sensoriamento remoto termal), nomes permanecem no idioma da qual foram adquiridos.

Sensoriamento Passivo	Satélite	Sensor	Coleção	Resolução	Datas	
Sensoriamento Remoto Multiespectral	LANDSAT 8-9	Operational Land Imager (OLI)	Collection 2 Level 2 (C2 L2)	30 m	26/12/2014 24/09/2015 29/12/2015 18/12/2017 03/09/2019 09/01/2020	13/12/2021 30/01/2022 25/01/2023 18/06/2023 06/09/2023 04/01/2024
Sensoriamento Remoto Termal	LANDSAT 8	Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Collection 2 Level 1 (C2 L1)	30 m	03/12/2023	

ANEXO 7 - Dados utilizados no sensoriamento remoto ativo (SAR e InSAR), nomes permanecem no idioma da qual foram adquiridos.

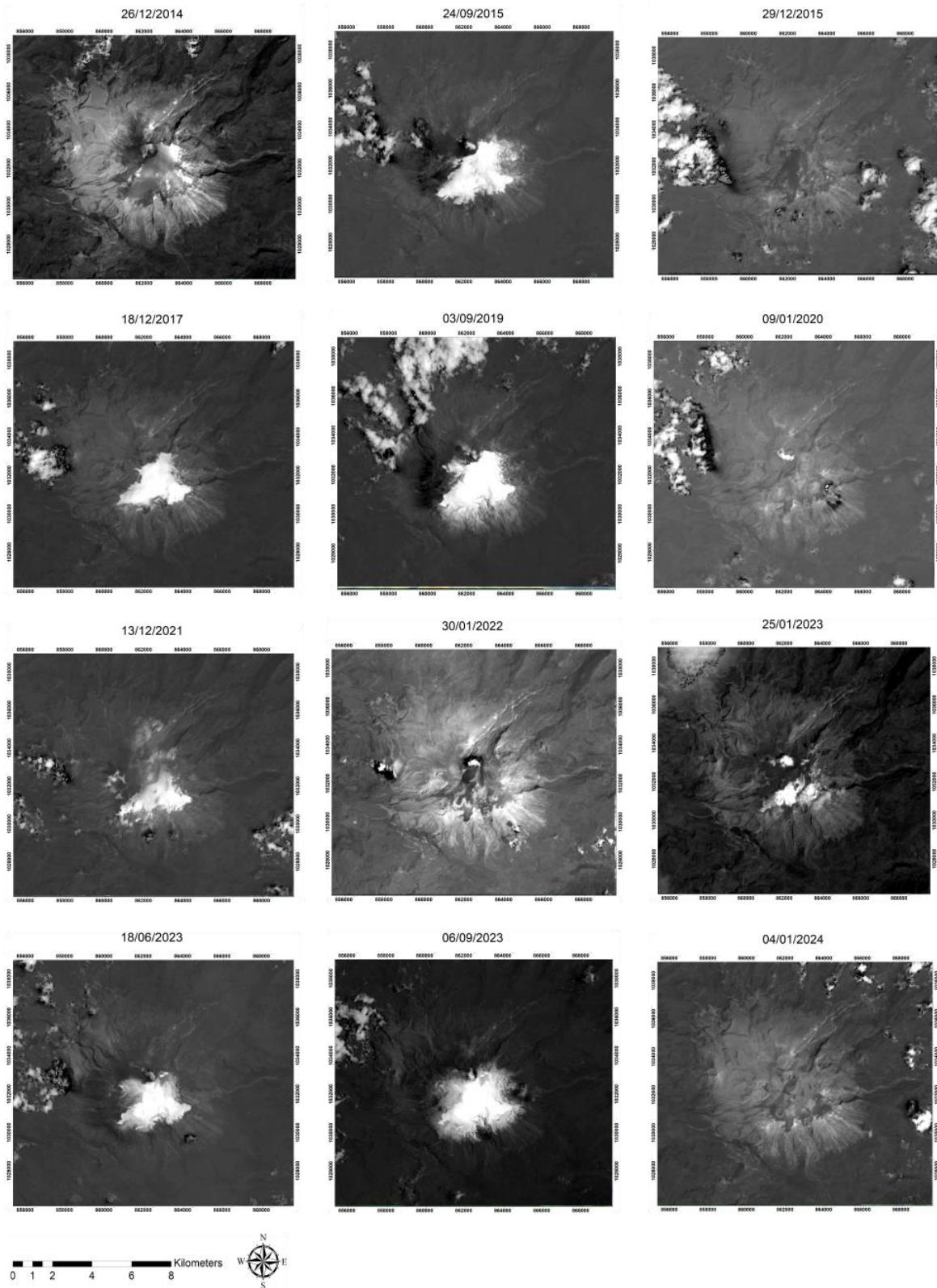
Sensoriamento Ativo	Satélite	Sensor	Resolução	Datas		
SAR	ALOS	PALSAR (L-Band)	12,5 m	19/12/2010 05/01/2011 17/01/2011 15/03/2011		
InSAR	SENTINEL-1A	SAR (C-Band)	5×20 m	10/06/2020 09/08/2020 26/09/2020 09/06/2021 15/10/2021 14/12/2021 12/07/2022	05/08/2022 16/10/2022 20/01/2023 02/04/2023 07/07/2023 24/08/2023 11/10/2023	04/11/2023 28/11/2023 22/12/2023 03/01/2024 20/02/2024 08/04/2024

ANEXO 8 - Cadeia de processamento dos dados InSAR para mapas de deslocamento.



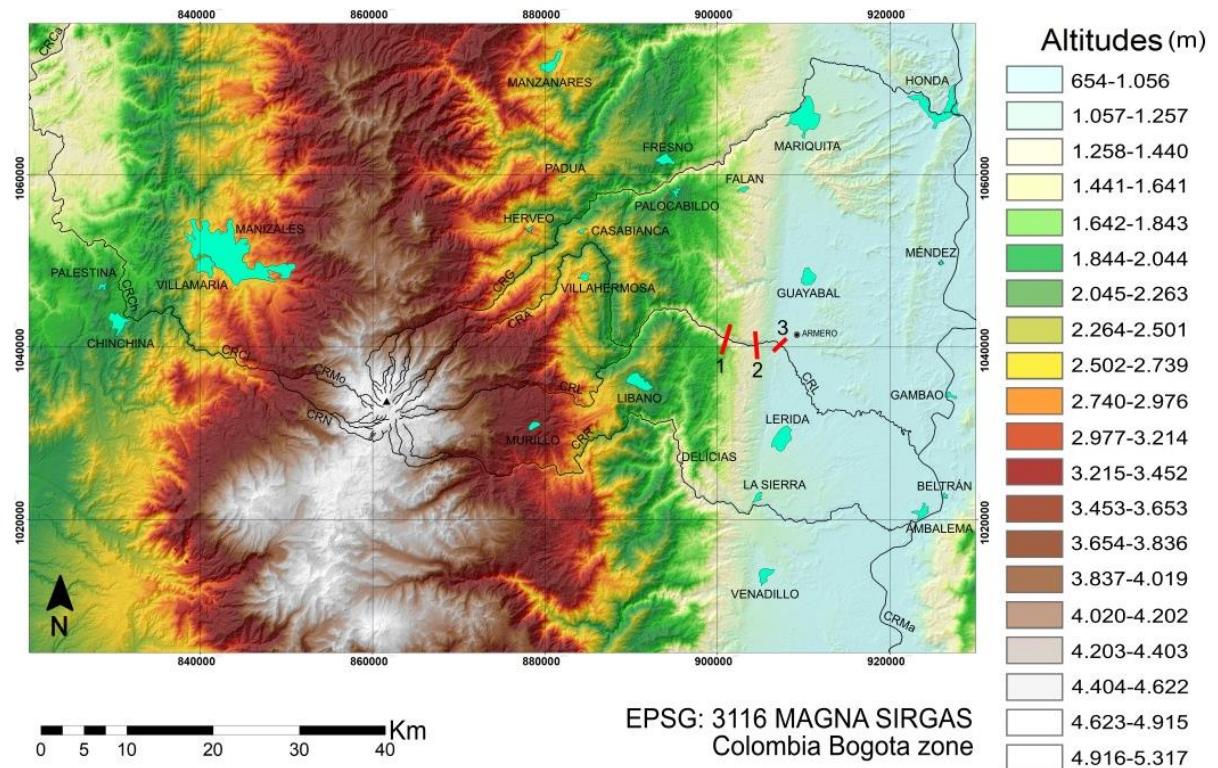
ANEXO 9 - Histórico da cobertura do edifício vulcânico na banda 2.

BANDA 2 (BLUE)



ANEXO 10 - Mapa hipsométrico com localização das cidades e perfis dos canais dos principais rios.

MAPA HIP SOMÉTRICO COM LOCALIZAÇÃO DE CIDADES



— Canais dos principais rios:

CRL - canal rio Lagunillas

CRMa - canal rio Magdalena

CRMo - canal rio Molinos

CRN - canal rio Nereidas

CRR - canal rio Recio

CRA - canal rio Azufrado

CRCa - canal rio Cauca

CRCh - canal rio Chinchiná

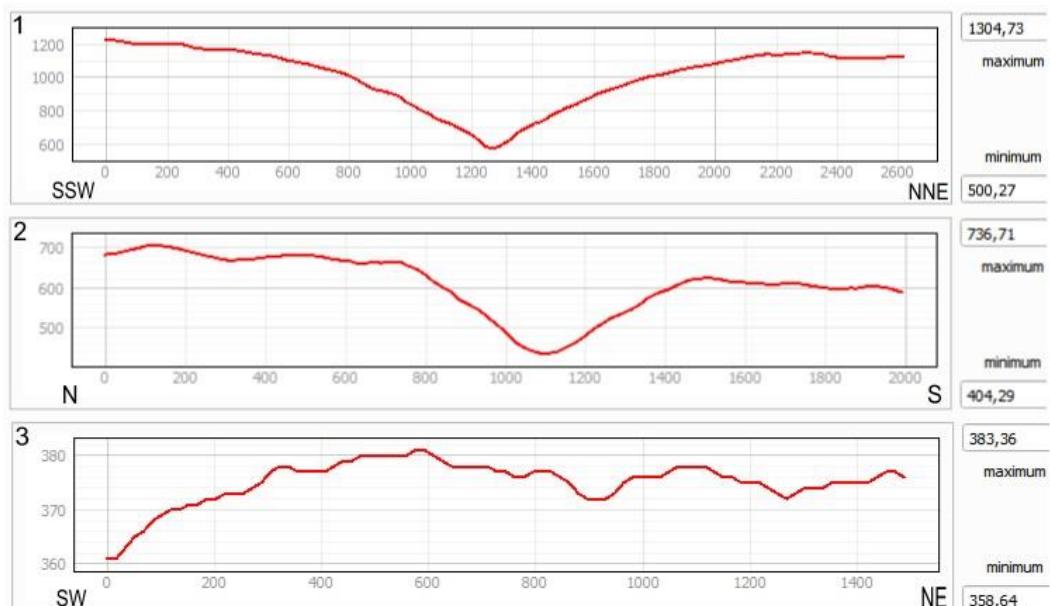
CRCI - canal rio Claro

CRG - canal rio Gualí

▲ Nevado del Ruiz

■ Cidades

PERFIS TRANSVERSAIS DOS TRÊS PONTOS INDICADOS NO RIO LAGUNILAS:



ANEXO 11 - Distância entre as cidades, a cratera arenas e seu rio mais próximo.

Flanco Oeste

Cidade	Distância da cratera Arenas (km)	Distância do Rio Claro (km)
Manizales	30	16
Villamaría	28	13
		Distância do Rio Chinchiná (km)
Chinchiná	33	< 1
Palestina	36	< 2

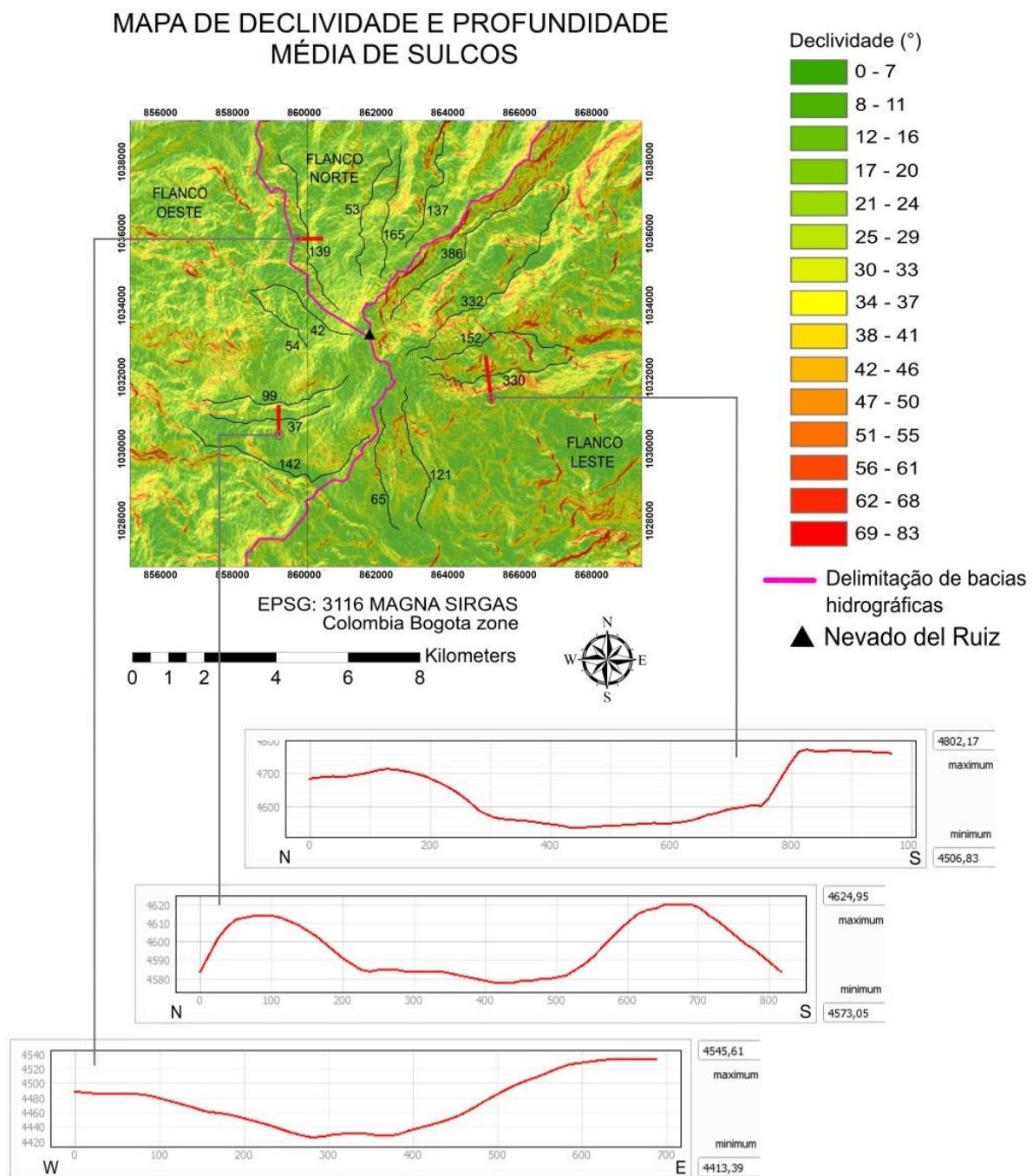
Flanco Norte

Cidade	Distância da cratera Arenas (km)	Distância do Rio Gualí (km)
Herveo	26	3
Casabianca	30	< 2
Padua	33	4
Fresno	43	2
Manzanares	44	16
Palocabildo	41	< 2
Falan	48	4
Mariquita	58	< 1
Honda	74	< 1

Flanco Leste

Cidade	Distância da cratera Arenas (km)	Distância do Rio Azufrado (km)
Villahermosa	27	3
Distância do Rio Lagunillas (km)		
Murillo	17	4
Libano	29	3
Lerida	45	5
Guayabal	51	8
Mendez	66	21
Cambao	65	8
Distância do Rio Recio (km)		
Venadillo	48	8
La Sierra	44	< 2
Delicias	36	< 2
Ambalema	62	< 2
Beltrán	65	5

ANEXO 12 - Mapa de declividade e profundidade média dos sulcos no edifício vulcânico do Nevado del Ruiz, junto de exemplo de perfis direcionados para cada flanco, mostrando profundidade e largura.



ANEXO 13 - Boletins extraordinários utilizados para escolha de datas na produção de mapas de deformação.

Anomalias	Boletins pré anomalia	Boletins de anomalias	Boletins pós anomalia
Agosto de 2020	Boletim semanal entre 02/06/2020 e 08/06/2020 ³⁷	Boletim extraordinário de 08/08/2020 ³⁸	Boletim semanal entre 22/06/2020 e 28/06/2020 ³⁹
Outubro de 2021	Boletim semanal entre 01/06/2021 e 07/06/2021 ⁴⁰	Boletim extraordinário de 14/10/2021 ⁴¹	Boletim semanal entre 07/12/2021 e 13/12/2021 ⁴²
Agosto de 2022	Boletim semanal entre 12/07/2022 e 18/07/2022 ⁴³	Boletim extraordinário de 05/08/2022 ⁴⁴	Boletim semanal entre 11/10/2022 e 17/10/2022 ⁴⁵
Abril de 2023	Boletim semanal entre 17/01/2023 e 23/01/2023 ⁴⁶	Boletim extraordinário de 02/04/2023 ⁴⁷	Boletim semanal entre 04/07/2023 e 10/07/2023 ⁴⁸
Outubro de 2023	Boletim semanal entre 22/08/2023 e 28/08/2023 ⁴⁹	Boletim extraordinário de 12/10/2023 ⁵⁰	Boletim semanal entre 31/10/2023 e 06/11/2023 ⁵¹
Novembro de 2023	Boletim semanal entre 31/10/2023 e 06/11/2023 ⁵²	Boletim extraordinário de 04/12/2023 ⁵³	Boletim semanal entre 19/12/2023 e 25/12/2023 ⁵⁴

³⁷ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_nevado_del_ruiz_del_02_de_junio_al_08_de_junio_de_2020.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

³⁸ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_extraordinario_de_aumento_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_INCREMENTO_SISMICO_08_de%20agosto_de_20209_2115.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

³⁹ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_22_al_28_de_septiembre_de_2020.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁰ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_01_al_07_de_junio_de_2021.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴¹ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_Extra_Actualizacion_Actividad_VNRuiz_14_oct_2021.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴² Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_07_al_13_de_diciembre_de_2021.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴³ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_12_de_julio_al_18_de_julio_de_2022.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁴ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_extraordinario_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_5_de_agosto_de_2022_2100_-_AUMENTO_ACTIVIDAD_SISMICA.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁵ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_11_al_17_de_octubre_de_2022.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁶ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_17_de_enero_al_23_de_enero_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁷ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_extraordinario_volcan_Nevado_del_Ruiz_-_02_de_abril_0930.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁸ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_04_de_julio_al_10_de_julio_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁴⁹ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_22_de_agosto_al_28_de_agosto_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁵⁰ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_Extraordinario_de_aumento_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_incremento_par%C3%A1metros_12_de_outubre_0345.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁵¹ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_22_de_agosto_al_28_de_agosto_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁵² Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_22_de_agosto_al_28_de_agosto_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

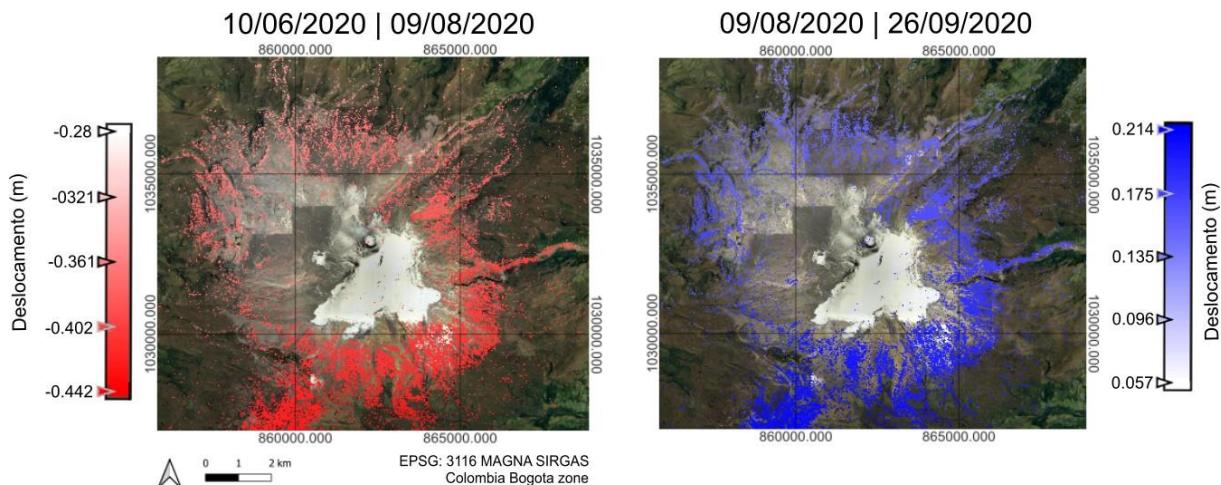
⁵³ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_Extraordinario_de_aumento_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_incremento_parametros_04_de_diciembre_0450_pm.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁵⁴ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Nevado_del_Ruiz_del_19_de_diciembre_al_25_de_diciembre_de_2023.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

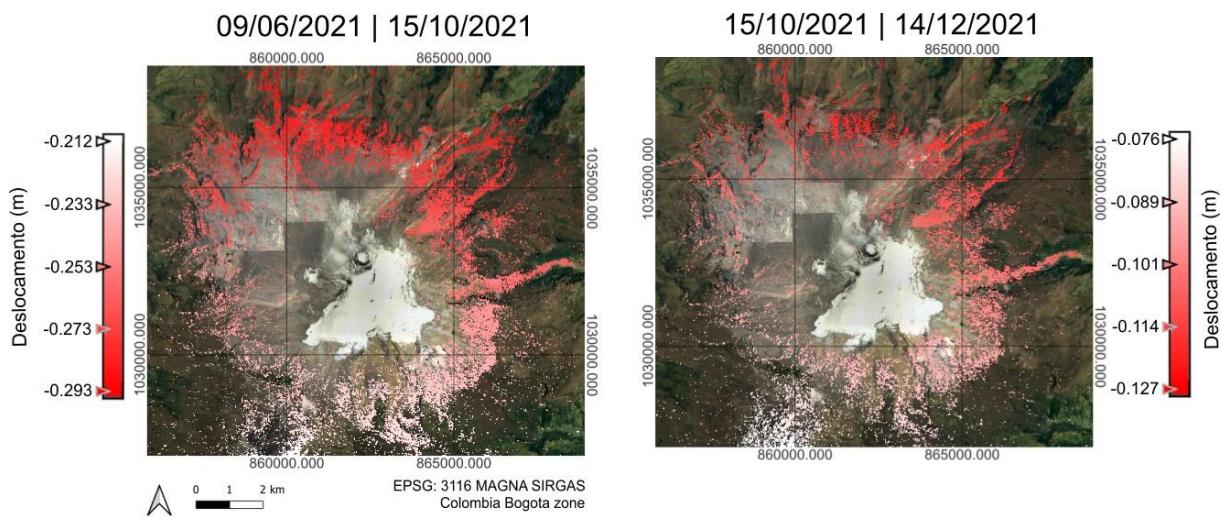
Fevereiro de 2024	Boletim semanal entre 02/01/2024 e 08/01/2024 ⁵⁵	Boletim semanal entre 13/02/2024 e 19/02/2024 ⁵⁶	Boletim semanal entre 02/04/2024 e 09/04/2024 ⁵⁷
-------------------	-------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------

ANEXO 14 - Mapas de deslocamento do vulcão Nevado del Ruiz em eventos de anomalia.

ANOMALIA EM AGOSTO DE 2020



ANOMALIA EM OUTUBRO DE 2021

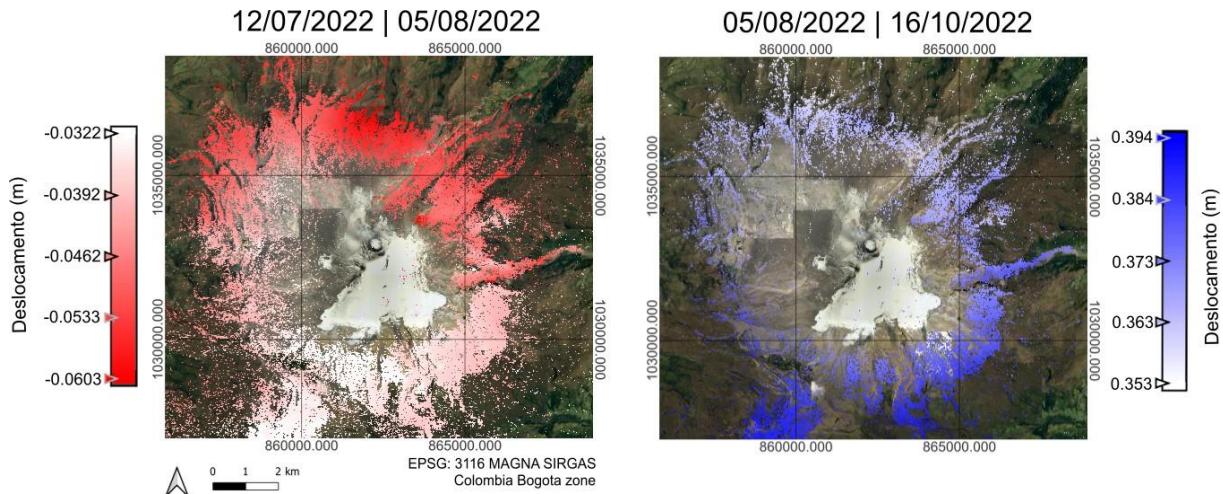


⁵⁵ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_vulcan_Nevado_del_Ruiz_del_02_de_enero_al_08_de_enero_de_2024. Acesso em: 03/07/2024.

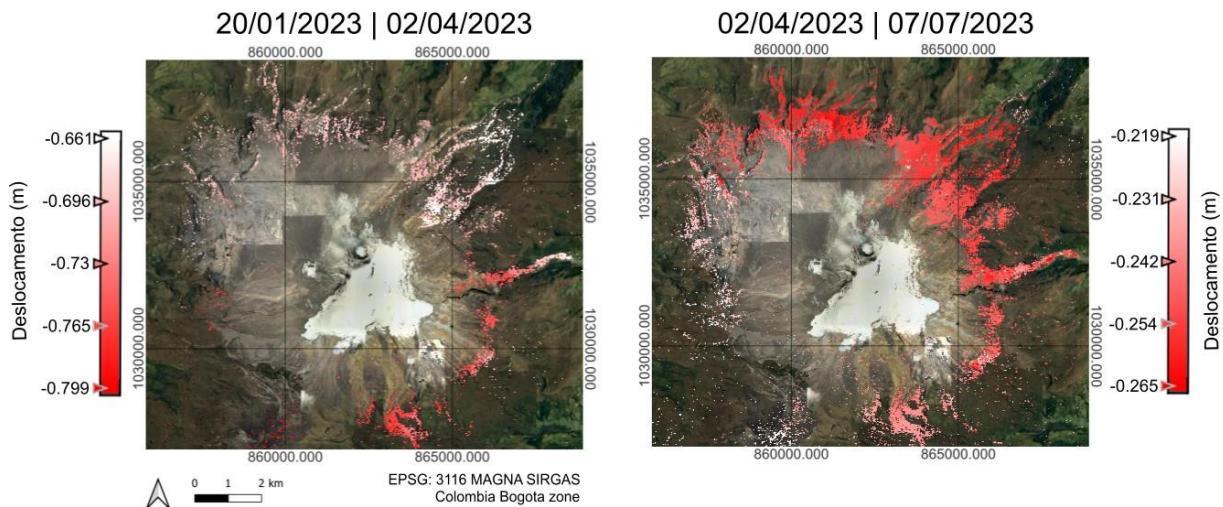
⁵⁶ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_vulcan_Nevado_del_Ruiz_del_13_de_febrero_al_19_de_febrero_de_2024.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

⁵⁷ Disponível em: https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_vulcan_Nevado_del_Ruiz_del_02_de_abril_al_09_de_abril_de_2024.pdf. Acesso em: 03/07/2024.

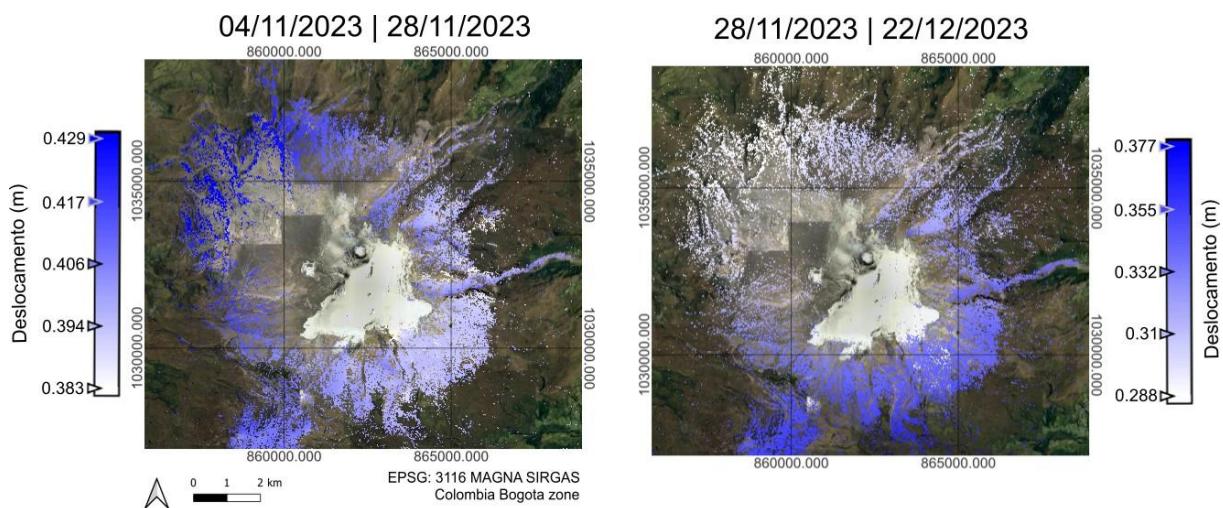
ANOMALIA EM AGOSTO DE 2022



ANOMALIA EM ABRIL DE 2023



ANOMALIA EM NOVEMBRO DE 2023



ANOMALIA EM FEVEREIRO DE 2024

03/01/2024 | 20/02/2024

20/02/2024 | 08/04/2024

