

GEOTECNOLOGIAS NO CONTEXTO DAS CIDADES MAIS RESILIENTES: ZONEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A INUNDAÇÕES COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO URBANO

GEOTECHNOLOGY IN THE CONTEXT OF MORE RESILIENT CITIES: FLOOD RISK ZONING FOR URBAN PLANNING

GEOTECNOLOGÍAS EN EL CONTEXTO DE LAS CIUDADES MÁS RESILIENTES: ZONACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO A INUNDACIONES COMO HERRAMIENTA PARA EL PLANEJAMIENTO URBANO

Sabrina Deconti Bruski

Curso de Geologia, Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Francisco Manoel Wohnrath Tognoli

Curso de Geologia, Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
Programa de Pós-Graduação em Geologia, Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
ftognoli@unisinis.br

Thiago Peixoto de Araújo

Curso de Geologia, Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
A&T Geotecnia e Meio Ambiente

RESUMO

As inundações são processos naturais que historicamente afetam as populações que se desenvolvem próximo a cursos hídricos, ocupando suas margens e sua planície de inundação. A migração crescente da população das zonas rurais para as cidades tem causado problemas de urbanização que potencializam os danos relacionados aos desastres naturais, como inundações e movimentos de massa. O conceito de cidades mais resilientes contribui para que as cidades possam se planejar e se adaptar frente a eventos de qualquer natureza, em especial desastres naturais e desastres humanos, permitindo que a recuperação e a retomada da rotina ocorram de forma rápida. Nesse sentido, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) propõe 17 objetivos visando o desenvolvimento sustentável. Esse trabalho está diretamente relacionado ao objetivo 11, que tem por meta reduzir o número de perdas e atingidos pelos desastres relacionados à água até 2030. O estudo de caso aqui apresentado refere-se ao município de Encantado, situado no Vale do Rio Taquari, Estado do Rio Grande do Sul. Os objetivos do trabalho foram analisar a série histórica de dados pluviométricos (1941-2020) da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (BHTA), identificando as condições determinantes para as inundações recorrentes nessa região, e determinar a relação entre as cotas de inundação e as áreas atingidas, propondo um zoneamento de risco à inundação para a área urbana. As condições determinantes para as inundações incluem o mês do ano, a quantidade de dias chuvosos consecutivos, os picos de precipitação na BHTA, a ocorrência de picos de precipitação maiores de 30 mm e o tempo de retorno (TR). A análise dos dados identificou 44 eventos de inundação desde 1941, com crescimento acentuado do número de eventos nos últimos 10 anos. Para 29 eventos registrados, obteve-se TR de 2 anos, indicando alta probabilidade de ocorrência. O zoneamento de risco delimitou uma mancha de inundação equivalente a 10% da área do município. A comparação dos polígonos de crescimento da área urbana nos últimos 46 anos mostrou que a cidade continua crescendo em direção às cotas altimétricas mais baixas, portanto com maior risco de inundação, mesmo com as restrições definidas no Plano Diretor Municipal.

Palavras-chave: Gestão territorial. Série histórica. Cobertura superficial. Risco Geológico. Zoneamento de risco

ABSTRACT

Floodings are natural processes that historically affect people living near rivers or other water bodies. The increase of the population in cities has caused serious urbanization problems that potentialize dangers related to a disaster, such as flooding and mass movements. The concept of resilient cities helps cities plan and adapt strategies against natural and human disasters, recovering their daily activities rapidly. ONU's Agenda 2030 proposed 17 Sustainable Development Goals. This work is directly related to the goal11, which intends to develop Sustainable Cities and Communities, reducing of natural disasters' adverse effects. The study case presented here approach the municipality of Encantado, southern Brazil. We analyzed the historical data series of the Taquari-Antas River Basin to identify the controls of floodings in this region between 1941 and 2020 and different zones affected by increasing flooding levels in Encantado's urban area. We identified 44 flooding events since 1941. The number of floodings in the last ten years also increased, and the year 2020 recorded the maximum flooding of the Rio Taquari River at Encantado, with 20,27 meters. Ten percent of the municipality are in areas potentially affected by floodings.

Palavras-chave: Territorial management. Historical data series. Geological Risk. Risk Zoning.

RESUMEN

Inundaciones son procesos naturales que afectan las comunidades y personas que viven y se desarrollan cerca de las márgenes y planicies asociadas a ríos y otros cuerpos de agua. La migración de la población mundial de las zonas rurales hacia los centros urbanos ha causado problemas crecientes de urbanización, potencializando los daños de los desastres naturales, como inundaciones y derrumbes. El concepto de ciudades más resilientes contribuye para que las comunidades urbanas puedan desarrollar planes y estrategias adaptativas para enfrentar desastres naturales y antrópicos, permitiendo una rápida recuperación. En este sentido, la Agenda 2030 de las Naciones Unidas propuso un total de 17 objetivos para el Desarrollo Sostenible. Este trabajo está directamente relacionado con el objetivo número 11.5, cuya propuesta es lograr que las ciudades y comunidades humanas sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. El estudio de caso presentado acá es de la ciudad de Encantado (Valle del Río Taquari, sur de Brasil). El análisis de los datos pluviométricos (1941-2020) de la Cuenca Hidrográfica Taquari-Antas permitió identificar las condiciones para que inundaciones ocurran en el área urbana, determinar la relación entre el nivel de río y las zonas afectadas en la ciudad y proponer una zonación de riesgo a inundaciones en dicha ciudad. Un total de 44 eventos de inundación fueron identificados desde 1941. El número de inundaciones en los últimos 10 años ha aumentado y el 2020 se registró la máxima inundación del Río Taquari (20,27m). Además, se determinó que el diez por ciento del área de la ciudad se encuentra en zona de riesgo y puede ser afectada por futuras inundaciones.

Palabras-clave: Manejo territorial. Datos históricos. Cobertura superficial. Riesgo geológico. Zonación de riesgo.

INTRODUÇÃO

O aumento do número de pessoas e o aumento da densidade populacional nos centros urbanos são uma tendência permanente registrada mundialmente nos últimos 100 anos. Estima-se que 75% dos habitantes do planeta viverão em centros urbanos em 2050. Os dados sobre desastres naturais, especialmente aqueles relacionados a ameaças climáticas, registram um aumento considerável no número de eventos (incluindo eventos extremos) e no número de pessoas afetadas nas últimas décadas, em grande parte atribuídos aos efeitos das mudanças climáticas globais (UNDRR, 2012). Por esta razão, o conceito de cidades e comunidades mais resilientes vem ganhando destaque e sendo adotado por várias cidades do mundo. Cidades mais resilientes são cidades que, expostas a ameaças e situações de perigo e desastres são capazes de absorver, adaptar e recuperar-se dos desastres de maneira eficaz, preservando e restaurando rapidamente suas estruturas e

funções básicas essenciais (Berlanga et al., 2016).

O conceito de cidades mais resilientes está integrado à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que abrange 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e propõe atividades ousadas em âmbito global até 2030, como a Campanha MCR "*Making Cities Resilient*" (UNDRR, 2010). Esses objetivos visam "*erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade*". (ONU, 2020). Os 17 objetivos consideram um desenvolvimento de forma sustentável e que integrem três áreas fundamentais: econômica, social e ambiental. O objetivo número 11.5 está diretamente ligado ao tema do presente trabalho, que prevê a gestão dos espaços urbanos, planejamento e implantação do conceito de resiliência urbana e tem como uma das metas: "*Até 2030, reduzir o número de mortes e afetados por catástrofes incluindo os desastres relacionados à água e diminuir as*

perdas econômicas com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade” (UNDRR, 2020).

No Brasil, o crescimento desordenado e sem planejamento das áreas urbanas ocorre desde a década de 1950, intensificada pelo desenvolvimento da indústria e pela migração permanente da zona rural para as cidades (IBGE, 2006). A falta de planejamento para o desenvolvimento urbano e a omissão do poder público em relação à ocupação de áreas impróprias permite que a população socioeconomicamente mais vulnerável se estabeleça em áreas de risco e exponha-se a situações de risco natural (e.g., inundações, movimentos de massa, radiação natural) e antrópico (e.g., contaminação por metais pesados, esgoto) etc.

O meio físico é o elemento primordial para o planejamento das ações de mitigação de desastres naturais e impactos ambientais. Os geocientistas, como profissionais habilitados a entender a dinâmica do planeta e dotados de ferramental tecnológico para a aquisição, processamento, visualização e interpretação de dados espaciais, possuem papel fundamental na caracterização do meio físico e na tomada de decisões em ações estratégicas de planejamento urbano e implementação de ações efetivas de gestão territorial. Esta atuação tende a se intensificar rapidamente nos próximos anos em razão da adoção das melhores práticas resilientes pelas cerca de 4300 cidades e regiões que compõem a Campanha MCR2030 (Young et al., 2019; UNDRR, 2020) e pela expectativa de adesão rápida para um número muito maior de cidades

e regiões nos próximos 10 anos. Além disso, a disseminação recente de sensores portáteis, especialmente em *smartphones* e veículos aéreos não-tripulados, a incorporação da *Internet of Things (IoT)* no cotidiano e o desenvolvimento de sistemas de transmissão *online* e armazenamento em nuvem criaram a estrutura necessária para que a base de dados do meio físico cresça exponencialmente. Isso, aliado à disponibilidade de plataformas e ferramentas de análises de dados, permite gerar modelos e simulações de diversos cenários, alimentar a base de dados em tempo real e embasar a tomada de decisões de forma rápida.

Apesar das possibilidades tecnológicas disponíveis, com potencial ilimitado de aplicação, o panorama atual do planejamento urbano e da gestão territorial enfrenta problemas básicos. Esse trabalho apresentará um estudo de caso relacionado às áreas inundáveis do Vale do Rio Taquari no município de Encantado-RS. O problema é recorrente na cidade e tem se agravado nas últimas décadas. No ano de 2020, o município registrou a maior inundação desde que o nível do Rio Taquari começou a ser monitorado de forma permanente, em 1941. A população foi surpreendida pela inundação, apesar da existência de um sistema de monitoramento ativo e de dados disponíveis que poderiam ter sido usados para emitir alertas e evitar perdas materiais.

DESASTRES NATURAIS e POLÍTICAS PÚBLICAS

Os desastres naturais são eventos que causam danos ao espaço físico e social e cujas consequências se estendem além do momento do

evento. Seus efeitos são imediatos, mas os impactos posteriores gerados na sociedade comumente são mais danosos. Muitas vezes excedem a capacidade da sociedade em se reorganizar e exigem ação efetiva do poder público para reestabelecer seu funcionamento e mitigar as consequências das perdas humanas, materiais e ambientais. Os impactos dos desastres naturais têm relação direta tanto com a localização geográfica e as características geológico-geomorfológicas quanto com as condições econômicas, sociais, políticas e culturais dos locais onde ocorrem (Alcántara-Ayala, 2002).

O aumento do número de eventos verificado nas últimas décadas e o número maior de pessoas atingidas reflete o aumento das vulnerabilidades natural e humana. Dentre as causas do aumento da vulnerabilidade natural, destacam-se as mudanças climáticas globais e o aumento dos eventos extremos (Lacerda & Nobre, 2010, Molion, 2008; Tominaga et al., 2015, Alves et al., 2020; Lincoln et al., 2020; Marengo et al., 2020). Dentre as causas de aumento da vulnerabilidade humana, tem destaque o aumento da população e o aumento da densidade populacional nos centros urbanos nas últimas décadas. O aumento da exposição da população ao risco natural (vulnerabilidade x perigo) e a diminuição da capacidade de enfrentamento de problemas em virtude do aumento da população nos centros urbanos explica o aumento crescente de pessoas afetadas pelos desastres naturais em todo o mundo.

No Brasil, a maioria dos desastres naturais está historicamente associada a fenômenos de origem atmosférica relacionados à água (e.g.,

movimentos de massa, inundações, secas) (Bertone & Marinho, 2013; Riffel *et al.* 2016). Mas, apesar do histórico de pesquisas de mais de 50 anos em cartografia geotécnica, o Brasil intensificou investimentos na área de resposta aos desastres somente depois dos eventos com dezenas de vítimas fatais ocorridos em Santa Catarina em 2008 (Blumenau) e na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 (Nova Friburgo, Petrópolis). Apenas em 2011 o governo brasileiro incorporou a política de prevenção de desastres à sua agenda permanente, por ocasião do Seminário Internacional sobre Gestão Integrada de Riscos e Desastres, ocorrido em Brasília (Alheiros, 2011).

A Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012, instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), com o objetivo de implementar a gestão de riscos de desastres e a gestão de desastres como forma de garantir a dignidade da população e garantir a promoção do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012). As ações incluem a implantação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC), constituído por órgãos e entidades dos governos federal, estadual e municipal e de entidades públicas e privadas com atuação na proteção e defesa civil, e coordenados pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, órgão do Ministério do Desenvolvimento Regional (BRASIL, 2012). Outros órgãos, como o Sistema Nacional de Informações e Monitoramento de Desastres (SINIDE), o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) integram uma rede de informações, monitoramento e

alerta que atendem o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, que tem ações em quatro esferas e incluem obras de prevenção, resposta e mapeamento, monitoramento e alertas. Mais recentemente, a Portaria nº 2, de 3 de janeiro de 2020 "criou e instituiu o Grupo de Resposta a Desastres (GRD)" (BRASIL, 2020).

O Brasil gastava até sete vezes mais com remediação do que com prevenção (Alheiros, 2011). A implantação progressiva de políticas de monitoramento e alerta de desastres reduzido essa proporção e tem sido muito mais efetiva para reduzir perdas econômicas, sociais e de vidas humanas. Entre 2013 e 2018, utilizou-se R\$ 239 milhões de recursos federais com ações de prevenção e R\$ 1 bilhão em ações de remediação das áreas afetadas por desastres segundo a Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2018). A prevenção está associada à análise, avaliação e mapeamento de risco como subsídio à criação de políticas voltadas à redução dos desastres. Conhecer e caracterizar os atributos do meio físico é fundamental para um planejamento urbano em escala local e regional, visto que é no meio físico que se desenvolvem as ações antrópicas que podem desencadear os desastres naturais. (Zuquette, 1987). O entendimento dos processos geológicos e da interação do ser humano com o meio físico é fundamental para entender e avaliar os diferentes riscos naturais que podem desencadear os desastres (Alcántara-Ayala, 2002).

MEIO FÍSICO, ÁREAS DE RISCO E GESTÃO TERRITORIAL

A caracterização do meio físico, aliada à sua representação gráfica,

permitiu que a cartografia geológico-geotécnica fosse aceita e adotada amplamente como instrumento de planejamento e gestão territorial a partir da década de 1960 (Zuquette & Gandolfi, 2004). Existem diferentes escolas e métodos de trabalho em todo o mundo que utilizam os atributos do meio físico e suas propriedades para gerar diferentes produtos cartográficos (*e.g.*, cartas, mapas) úteis para a caracterização e planejamento do uso e ocupação do solo, avaliações de áreas frágeis, avaliação de aquíferos e prevenção de desastres naturais (Prandini *et al.* (1995), Zuquette & Gandolfi, 2004, Bitar, 2014).

A cartografia geológico-geotécnica consiste em um método sistemático de aquisição, análise e avaliação de características do meio físico que interfiram direta ou indiretamente no planejamento urbano e na gestão territorial regional (Zuquette, 1987). A disposição espacial dos dados e a parametrização das variáveis de interesse constituem a base fundamental para a elaboração de produtos específicos, a exemplo das cartas que identificam e delimitam áreas de risco. Segundo a Agência das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres (UNDRR, 2009), o conceito de risco está relacionado com a possibilidade de ocorrência de um evento com resultados negativos decorrente da interação entre perigo e vulnerabilidade. Os riscos naturais são classificados de acordo com sua origem e divididos em: a) atmosféricos (*e.g.*, tempestades, furacões), b) geológicos endógenos (*e.g.*, terremotos, vulcanismo) e c) geológicos exógenos (*e.g.*, inundações, movimentos de massa) (Augusto Filho *et al.* 1992; Reckziegel, 2007). Os riscos antrópicos incluem todas as situações passíveis de

afetar negativamente a dinâmica da sociedade e o bem-estar das pessoas, determinadas por ações humanas deliberadas, omissas ou negligentes.

E as áreas de risco, sendo os locais potenciais para a ocorrência de desastres, tem em seus elementos do meio físico os fatores condicionantes para a classificação das áreas em termos de suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco. A suscetibilidade representa a predisposição natural de uma área para desenvolver um evento de alteração do meio físico desencadeado por um processo geológico ou por uma ação antrópica (Lima, 2010; Sobreira & Souza, 2012; Bitar, 2014; Riffel *et al.*, 2016). A vulnerabilidade é determinada por atributos específicos do meio físico e biótico, preexistentes em uma área suscetível a ser atingida ou a sofrer consequências negativas, com grau de perdas e danos humanos e materiais variáveis (Zuquette, 1993; Bertone & Marinho, 2013, Bitar, 2014; Tominaga *et al.*, 2015). Perigo refere-se a um fenômeno, natural ou antrópico, responsável por danos materiais, econômicos e sociais e caracterizado pela localização, intensidade, frequência e probabilidade (Zuquette, 1993; UNDRR, 2009; Bitar, 2014; Santos *et al.*, 2018). O risco refere-se à possibilidade de ocorrência de um evento com perdas humanas e materiais e está diretamente relacionada com perigo e vulnerabilidade (Zuquette, 1993; Bombassaro & Robaina, 2010; Bitar, 2014).

O conhecimento do meio físico e sua representação adequada por meio do diagnóstico ambiental auxiliam na redução de desastres e subsidiam ações de planejamento e de gestão territorial urbana e regional

(Zuquette, 1987; Alheiros, 2011). Nesse sentido, com base no estado da arte sobre análise do meio físico, uso e ocupação do solo, cartografia geológico-geotécnica e planejamento e gestão territorial, faz-se necessário destacar a necessidade de investimento financeiro e intelectual no tema Coberturas Superficiais. Trata-se de um termo vago em termos de definição, inicialmente proposto aqui como: *"qualquer depósito de origem natural ou antrópica que recobre a superfície do planeta e está sujeito à dinâmica dos processos intempéricos"*. A gestão territorial deve considerar que os aspectos geomorfológicos e geológicos de qualquer área são passíveis de influência ou modificação de origem antrópica ao longo da história. Sendo assim, a harmonia entre o uso do território e práticas de desenvolvimento planejado e sustentável garantirão uma gestão eficiente das áreas de risco e das ações mitigadoras.

CIDADES MAIS RESILIENTES

Existem variadas definições para o termo resiliência, mas o termo originalmente vem do latim *resilio*, que significa recuperar-se. O significado mais amplo é: *"capacidade de algo ou alguém enfrentar uma adversidade decorrente de evento/ameaça anormal, muitas vezes inesperada, de se recuperar e depois retornar à normalidade"*. O termo tem sido constantemente associado ao desenvolvimento e ao crescimento urbano (Günter *et al.*, 2017). A conceituação de resiliência urbana é recente e está em constante aperfeiçoamento, sendo relacionado às realidades locais. Por isso, é importante entender a realidade da sociedade para trazer soluções que não interfiram na cultura nem

na identidade local, tornando as cidades mais resiliente e melhorando a qualidade de vida de todos (Meotti & Chiarelli, 2019). Outro conceito fundamental associado à resiliência urbana é a Estratégia Internacional para a Redução de Riscos de Desastres (EIRD), que define resiliência relacionada aos desastres como uma competência da sociedade em enfrentar, assimilar e se adequar frente aos eventos extremos como mudanças climáticas, físicas e sociais em tempo ágil e de maneira eficaz (UNISDR, 2009).

O termo cidades mais resilientes está diretamente ligado ao projeto da ONU denominado Agenda 2030, firmada em 2015 por líderes mundiais na sede da ONU localizada em Nova Iorque (EUA). A Agenda 2030 propõe 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas. Este é um plano de ação mundial com discussão sobre assuntos como proteção do planeta, erradicação da pobreza, justiça social, saneamento, urbanização entre outras questões ligadas ao desenvolvimento sustentável e à vida nos centros urbanos, sempre prezando pelos cinco P: Pessoas, Prosperidade, Paz, Parcerias, Planeta. (UNITED NATIONS, [2020?]); BRASIL, [2017]).

O objetivo número 11 recomenda: *"Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis"*. E como meta número 11.5, conforme temos: *"Até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e diminuir substancialmente as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em*

proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade" (BRASIL, 2017)

De acordo com UNITED NATIONS [2020?], o número de pessoas vivendo em áreas urbanas é cada vez maior e o crescimento dos centros urbanos sem planejamento levará as pessoas a habitar áreas inadequadas, sem infraestrutura e de risco, tornando os centros urbanos mais vulneráveis às mudanças climáticas e a desastres naturais e/ou antrópicos. Por essa razão, a disseminação e implantação do conceito de resiliência urbana é fundamental para evitar perdas humanas, sociais e econômicas.

INUNDAÇÕES

As inundações, enchentes e enxurradas são os desastres relacionados à dinâmica da água que acontecem com mais frequência no Brasil (Reckziegel, 2007). Ocorrem devido a índices elevados de precipitação pluviométrica e representam eventos naturais e recorrentes que afetam especialmente áreas fluviais (Oliveira et al., 2018). As inundações ocorrem pelo aumento do nível de água, quando ultrapassa o limite de transbordamento dos canais, extravasando para além das margens e alagando as planícies próximas (Bitar, 2014). São eventos naturais ocasionados pela precipitação pluviométrica acentuada e contínua (Reckziegel, 2007). No entanto, cabe destacar que descargas de água de natureza antrópica também podem causar inundações.

As inundações são classificadas, segundo sua evolução, em enchentes ou inundações graduais e enxurradas ou inundações bruscas. As enchentes ou inundações graduais são caracterizadas pela elevação

contínua e prognosticável da água, que pode permanecer em estado de cheia ao longo de um tempo e escoar gradativamente de montante para jusante. Geralmente possuem caráter periódico e sazonal e são relacionadas principalmente aos períodos com chuvas constantes e com períodos de chuvas acentuadas e localizadas (Castro, 2003). Quando as chuvas ocorrem localizadas e acentuadas em um tempo pequeno, a inundação será classificada como enxurrada e se as chuvas ocorrerem localizadas e acentuadas por um tempo maior a inundação será classificada como enchente (Reckziegel, 2007). Existem dois tipos de inundações que podem acontecer de maneira composta ou separada, as inundações ribeirinhas e as inundações em virtude da urbanização (Tucci, 2012). O excesso de chuva muitas vezes não pode ser drenado de forma eficiente e inunda áreas ribeirinhas, que podem estar localizadas tanto na área urbana quanto na área rural do município. Em zonas rurais, essas áreas são destinadas a agricultura e pecuária, com poucas moradias e potencial de danos baixo. Em zonas urbanas, o problema se agrava em função da ocupação das margens e planície da inundação e da impermeabilização dos solos, que diminui a capacidade de infiltração, ocasiona acúmulo de água no sistema de drenagem e resulta em inundações recorrentes (Tucci & Bertoni, 2003).

A estação fluviométrica e pluviométrica de Encantado foi inaugurada em outubro de 1941 e já registrou mais de 65 eventos de inundação (Peixoto & Lamberty, 2019). Desde 2013, o município conta com um sistema de monitoramento em tempo real dos dados de vazão e dos níveis dos rios que compõe a BHTA. O Sistema de Alerta de Eventos

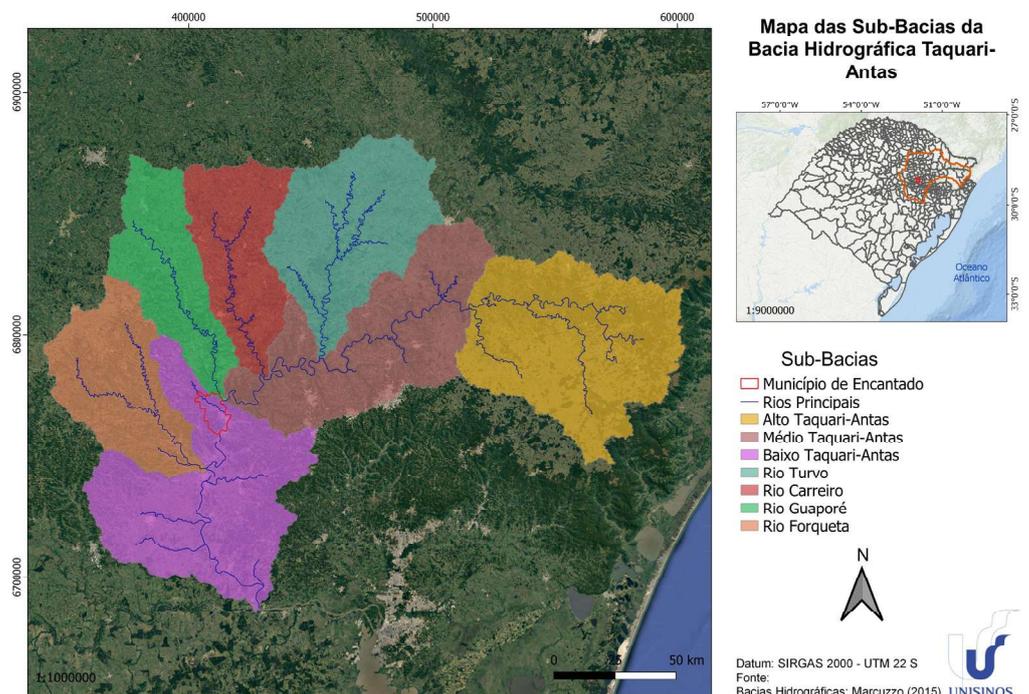
Críticos (SACE), desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil, dispõe de um sistema que prevê as cotas de inundação e emite alertas com 12 horas de antecedência para o município (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2020). O sistema emite estado de atenção quando o rio atinge a cota de 5,00 m e estado de alerta em 9,00 m. Conforme dados Agência Nacional de Águas ANA (2020), em Encantado, o Rio Taquari atinge o ponto de transbordamento do leito principal e inundação da planície fluvial adjacente na marca de 11,0 metros, e atinge as primeiras ruas e residências a partir de 14,00 metros (Kurek, 2012; Peixoto & Lamberty, 2019; ANA, 2020). Os boletins com as previsões são encaminhados para o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Agência Nacional de Águas (ANA), Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) e Defesa Civil (municipal e estadual), que adotam as medidas necessárias para minimizar as perdas (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, [2020?]).

ÁREA DE ESTUDO E MEIO FÍSICO

O Vale do Taquari está localizado na área baixa da Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas (BHTA) e constantemente registra volumes de chuvas concentrados nas áreas mais elevadas da bacia, que condicionam vazões altas e ocasionam inundações no Vale do Rio Taquari (Ferri, 2012; Kurek, 2012). Esta bacia engloba uma área de 26.491,82 km² e localiza-se sobre as províncias geomorfológicas do Planalto Meridional e Depressão Central, abrangendo parte dos Campos de Cima da Serra e parte na região do Vale do Taquari. As sub-bacias que compõe a BHTA são divididas em Alto, Médio e Baixo

Taquari-Antas, Rio Turvo, Rio Carreiro, Rio Guaporé e Rio Forqueta (Fig. 1). As sub-bacias dos rios Antas, Carreiro, Guaporé e Jacaré influenciam a quantidade de água que deságua no município de Encantado com uma área de contribuição de 19.300 km², onde grande parcela da cidade se situa sobre a planície de inundação. A área urbana situa-se próximo da foz do arroio Jacaré e da foz do rio Taquari (Brubacher et al., 2015).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas. Observar a posição do município de Encantado na BHTA em relação às sub-bacias a montante.



Cento e dezenove municípios integram a BHTA, correspondendo a 23,99% do território do Estado do Rio Grande do Sul (Ferri, 2012). Dez municípios, incluindo Encantado, pertencem ao Vale do Taquari e situam-se adjacentes ao curso do Rio Taquari. Condições naturais da BHTA relacionadas à geomorfologia, pedologia, clima e vegetação contribuem para a ocorrência de inundações (Ferreira & Both, 2001).

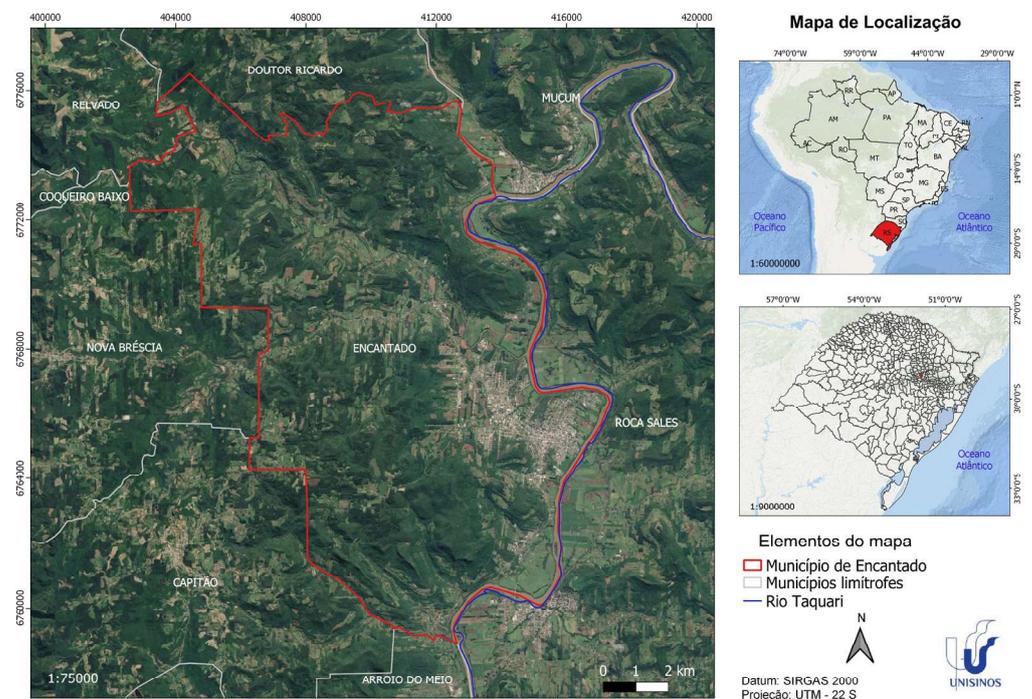
O município de Encantado localiza-se na porção centro-oriental do estado

do Rio Grande do Sul, no Vale do Rio Taquari (Fig. 2). É um município com 22.880 habitantes (IBGE, 2020) e que, nas últimas décadas, apresenta expansão territorial crescente para zonas suscetíveis aos processos hidrológicos e gravitacionais. Possui histórico de desastres relacionados a inundações, com prejuízos públicos e privados recorrentes. Entre 1980 e 2007, 55% dos eventos de inundação resultaram em decreto de Situação de Emergência Municipal, com prejuízos econômicos significativos (Bombassaro & Robaina, 2010).

Em setembro de 2012, as chuvas provocaram erosão da margem do rio, perda total de 3 residências e inundação no bairro Lajeado (Copello, 2012). Nos últimos 5 anos, houve um aumento significativo de eventos de inundação de grande magnitude. Em outubro de 2016, o rio atingiu a marca de 17,34 metros. Segundo a Prefeitura Municipal de

Encantado, esse evento obrigou 24 famílias a se abrigar em abrigos seguros. Os bairros mais atingidos foram Lago Azul, Barra do Jacaré, Vila Moça e Centro. Em julho de 2020, o nível do rio atingiu a marca recorde de 20,27 metros, com cerca de 700 residências e estabelecimentos comerciais e industriais inundados (Fig. 3).

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo, com limites do município e posição da mancha urbana adjacente ao curso do Rio Taquari.



Em relação à caracterização do meio físico, em Encantado ocorrem duas unidades geológicas, os basaltos da Formação Serra Geral (Fácies Gramado), que aflora na maior parte do município, e os depósitos aluvionares das margens do Rio Taquari, formados por depósitos sedimentares com granulometria variando de argila a cascalho (CPRM, 2008). Geomorfologicamente, as

rochas da Formação Serra Geral desenvolvem relevo com escarpas e declividades variando de 25° a 60° com predomínio de colinas e morros, enquanto os depósitos aluvionares ocorrem em vales fluviais com forte controle estrutural. O tipo de solo predominante na área é o Neossolo Litólico (Figura 10), solo pouco evoluído, pouco espesso e pedregoso, que ocorre em áreas de relevos mais

acidentados e dissecados. Ocorrem de forma subordinada Luvissoles crômico pouco profundo e Argissolo Vermelho alumínico, característicos dos terrenos basálticos. O clima na região de estudo é classificado segundo Köppen como Cfa, subtropical com verão quente, caracterizado pelas temperaturas médias superiores a 22°C no verão e com precipitação acima de 30 mm no mês mais seco.

Figura 3. Inundação do Rio Taquari em Encantado em julho de 2020, que atingiu o nível recorde de 20,27 metros. A) Vista aérea da área afetada. Fonte: ENCANTADO (2020). Disponível em: shorturl.at/mpBVW. Acesso em 10 jul. 2020. B) Registro da inundação no bairro Navegantes, no dia 08 de julho de 2020. C) Bairro Navegantes no dia 09 de julho de 2020.



Material e Métodos

O desenvolvimento do trabalho se baseou na geração de cartas temáticas em ambiente SIG e na análise de dados das estações pluviométricas da BHTA. Utilizou-se imagens do satélite CBERS-4, equipado com câmera PAN de resolução espacial de 5 metros para a banda 1 (pancromática) e 10 metros para as bandas 2, 3 e 4 (correspondente aos intervalos do

verde ao infravermelho próximo), para confeccionar as cartas de uso e ocupação de solo, após testes com os diferentes sensores em termos de resolução espectral, resolução temporal, resolução radiométrica e resolução espacial.

As imagens foram obtidas diretamente do *site* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referentes à órbita-ponto

158/133, do dia 14 de março de 2020. A resolução espacial da câmera pancromática e multiespectral (PAN) das bandas espectrais utilizadas é de 10 metros e resolução temporal de 26 dias. O satélite possui 60 km de faixa imageada a uma altitude de 778 km e órbita do tipo heliossíncrona (INPE, 2018).

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido a partir de dados do portal *Earthdata*, que armazenam e disponibilizam os produtos espaciais da *Alaska Satellite Facility* (UAF/NASA), geridos pela NASA. Foi selecionado o produto do ALOS *Palsar* com resolução espacial de 12,5 metros para gerar o MDE, obter as curvas de nível, gerar o relevo sombreado e calcular a declividade da área de estudo. Os valores da declividade foram obtidos em porcentagem para posterior aplicação da divisão em classes de declividade estabelecida pela EMBRAPA (1979). As manchas de inundação foram definidas a partir das curvas de nível e observações de campo.

As cartas temáticas foram geradas no *software QGIS* versão 3.10.5 'A Coruña', utilizando o sistema geodésico de referência oficial adotado no Brasil, SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), com a projeção UTM fuso 22, conforme determinação da Resolução Nº 1/2005 de 25/02/2005 do IBGE e WGS-84 (*World Geodetic System*), projeção 22 S. Para geração do mapa de localização utilizou-se os limites municipais e estaduais disponíveis na base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). A base hidrográfica da BHTA foi obtida no Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o sistema viário foi disponibilizado pelo Laboratório

de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS (LABGEO). A bases de geologia e a geomorfologia foram obtidas pelo GeoSGB (CPRM), escala 1:750.000. O mapa de localização da BHTA utilizou os dados de Marcuzzo (2018).

Foi realizada a composição colorida RGB 3/4/2, sendo a composição colorida resultante da combinação das bandas 3 (Vermelho), 4 (Infravermelho Próximo) e 2 (Verde) no *software QGIS*, versão 3.10.5. Em seguida, foi feita a classificação do uso e ocupação do solo com a ferramenta "*Semi-Automatic Classification Plugin*", que gera uma classificação semiautomática a partir de amostras de treinamento definidas na própria imagem-base.

Segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2020), a BHTA é monitorada por 10 estações. Entretanto, para as análises comparativas das precipitações foram utilizados dados de 6 estações, Encantado, Passo Tainhas, Vacaria, Ibiraiaras, Serafina Corrêa e Linha José Júlio (Quadro 1), sendo as cinco últimas localizadas a montante da cidade de Encantado. As estações de Passo Tainhas, Serafina Corrêa, Ibiraiaras e Vacaria possuem dados disponíveis no site da ANA a partir de junho de 1943. A estação Linha José Júlio tem dados somente a partir de janeiro de 2017. A coleta de dados da rede de monitoramento hidrológica presente na BHTA foi realizada a partir de medições pluviométricos e fluviométricos disponíveis publicamente no *site* da ANA, no portal HidroWeb Séries Históricas, no portal Hidrotelemetria e junto ao Serviço Geológico do Brasil. Os dados pluviométricos são coletados por meio de pluviômetros convencionais e/ou automáticos e os dados fluviométricos por leitura

manual da régua e/ou por telemetria, sendo que os últimos possibilitam o monitoramento diário em tempo real. Os dados obtidos foram organizados em planilhas Microsoft Excel para posterior análise e representação gráfica. Para todas as análises feitas neste trabalho foram usados dados brutos, em função de inconsistências observadas entre os valores dos dados brutos e dos dados consistidos, cujos relatórios finais ainda não estão disponíveis para análise e verificação.

Quadro 1 - Localização das Estações Pluviométricas/Fluviométricas na BHTA.

Nome	Tipo	Código	Município	Coordenadas
Encantado	Pluviométrica/	02951010/	Encantado	416990.81 m E
	Fluviométrica	86720000		6765768.07 m S
Passo Tainhas	Pluviométrica	02850009	Jaquirana	553042.72 m E 68065733.14 m S
Vacaria	Pluviométrica	02850045	Vacaria	504215.58 m E
				6846287.47 m S
Ibiraíaras	Pluviométrica	02851072	Ibiraíaras	438480.61 m E
				6862156.94 m S
Serafina Corrêa	Pluviométrica	02851073	Serafina	408563.26 m E
			Corrêa	6823521.59 m S
Linha José Júlio	Pluviométrica/	02951092/	Cotiporã	432321.94 m E
	Fluviométrica	86472000		6781110.73 m S

Para as análises dos dados da estação pluviométrica/fluviométrica Encantado, foram consideradas os anos que apresentaram, no mínimo, o registro completo de 8 meses no período de um ano, como forma de garantir dados com representatividade anual. Os dados da estação Encantado foram utilizados também para análise da série histórica, elaboração dos gráficos mensais e anuais e identificação das cotas máximas de inundação. Os picos de precipitação registrados nas 6 estações foram analisados e plotados em gráfico no intervalo entre janeiro de 2015 e 15 de agosto de 2020. Em seguida, foram analisados os picos de cada estação e realizada a comparação

entre elas considerando 48 horas antes e 48 horas após o registro do pico principal de precipitação em cada estação, tendo como referência precipitação igual ou maior que 30 mm. Isso permitiu estimar a relação e o tempo médio entre os picos de precipitação a montante e o eventos de inundação em Encantado.

Para avaliação da recorrência dos eventos de inundação em Encantado foram considerados os dados de Kurek (2016), que utilizou a distribuição probabilística Pearson tipo III para relacionar os tempos de recorrência para diferentes cotas (Quadro 2). Para avaliar o impacto potencial de inundações de diferentes magnitudes em relação

ao tempo de retorno, foram geradas cartas temáticas associando esses elementos ao crescimento da cidade de Encantado nas últimas décadas. Com base em imagens disponíveis no *Google Earth*, foram traçados e sobrepostos polígonos delimitando a mancha urbana entre os anos de 1984 e 2020.

na Resolução CONAMA Nº 303, de 20 de março de 2002 e na Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012, gerou-se uma carta temática com uma proposta de zoneamento de áreas aptas para a futura expansão municipal. Foram consideradas as áreas delimitadas no trabalho atingidas pela inundação, a declividade e as áreas de preservação permanente (APPs) do município.

Com base no Plano Diretor Municipal,

Quadro 2 – Relação entre o tempo de retorno (TR) e as cotas de inundação do Rio Taquari em Encantado. Observar que o tempo de retorno é de 5 anos para a cota de 15,00 metros, que se enquadra em inundações de grande magnitude.

TR	Cota de inundação (m)	TR	Cota de inundação (m)
2	11,74	50	22,11
3	13,37	60	23,32
5	15,07	70	23,78
8	16,97	80	24,17
10	17,27	90	24,51
20	19,97	100	25,16
25	20,05	150	25,35
30	21,23	200	26,2
40	22,10	250	26,85

Fonte: Adaptado de Kurek (2016).

RESULTADOS

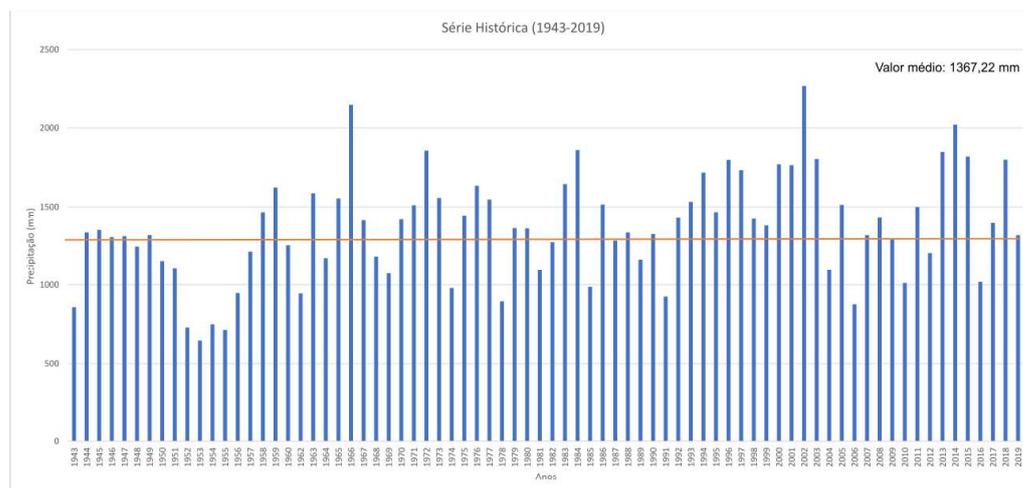
Os resultados obtidos a partir da análise da série histórica no período entre 1941 e 2020 revelou que o valor médio da precipitação anual no município é de 1367,22 mm (Fig. 4). Dentre os 5 maiores eventos registrados na cidade, 4 foram de magnitude grande e 1 de magnitude extrema, ocorrido em 8 de julho

de 2020 (Quadro 3). Salienta-se a presença de 3 picos com valores de chuva superiores a 1800 mm nos anos de 1966, 1984 e 2002, que denotam que os maiores eventos de inundação da cidade têm caráter cíclico, com intervalo de aproximadamente de 18 anos. Além disso, picos de precipitação acima da média ocorrem em intervalos menores, de 7 a 12 anos, aproximadamente.

Quadro 3 - Maiores eventos de inundação registrados em Encantado entre 1941 e 2020. Notar a magnitude extrema do evento de 8 de julho de 2020.

Ano do Evento	Maior cota registrada (m)
2020	20,27
2001	19,58
2011	19,50
1941	19,48
1956	19,33

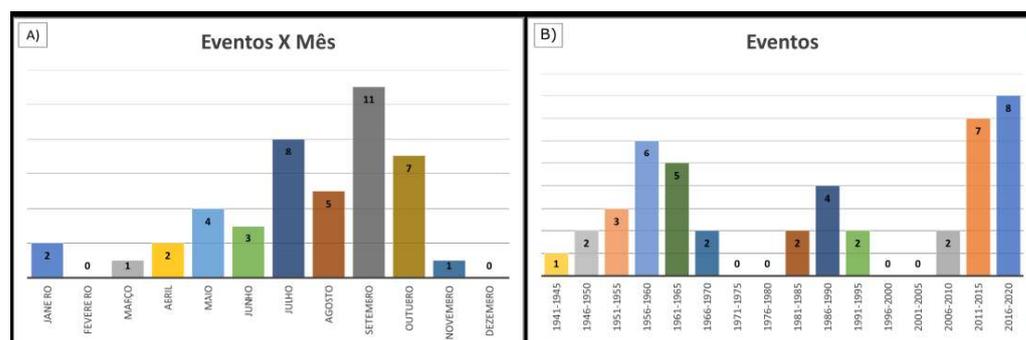
Figura 4. Série histórica de precipitações em Encantado entre 1941 e 2019. A linha laranja representa o valor médio da precipitação anual no intervalo analisado.



Os eventos de inundação ocorrem preferencialmente nos meses de inverno (julho) e de primavera (setembro e outubro), historicamente os meses mais chuvosos na área de estudo (Fig. 5). O mês de setembro registra 11 eventos de inundação, seguido pelos meses de julho (8 eventos) e outubro (7 eventos) (Fig.5A). Os meses de verão são tipicamente secos e possuem apenas dois eventos de inundações no intervalo da série histórica analisada. A distribuição anual dos eventos

foi agrupada de 5 em 5 anos para facilitar a comparação no intervalo da série histórica dos 44 eventos e evidenciar que o número de eventos aumentou consideravelmente nos últimos 10 anos, com 15 eventos registrados (Fig. 5B). Vemos que em um período de aproximadamente 30 anos ocorre o número máximo de eventos e que a recorrência dos eventos está crescendo, sendo que 15 eventos ocorreram no período entre 2011 e 2020 (Fig. 5B).

Figura 5. Dados sobre a frequência de ocorrência de eventos de inundação em Encantado. A) número de eventos por mês no intervalo da série histórica. B) número de eventos a cada 5 anos no intervalo da série histórica. Os intervalos de tempo sem ocorrência de eventos referem-se a período sem dados mínimos registrados na estação Encantado. Notar o aumento expressivo do número de eventos nos últimos 10 anos.



A análise dos registros dos 44 eventos no intervalo de 20 em 20 anos indica que entre os anos de 1941 e 1960 ocorreram 12 registros (27,2%), com o maior evento registrando o nível de 19,33 m. Entre os anos de 1961 e 1980 obteve-se 7 registros (15,9%), com o maior evento alcançando a cota de 18,46 m. Nos anos compreendidos entre 1981 e 2000 ocorreram 8 eventos (18,2%), no qual o maior evento alcançou 18,45 m. O período entre 2001 e 2020 registrou 17 eventos (38,7%), com a marca recorde de 20,27 metros atingida no evento de 8 de julho de 2020. Cabe destacar que o número de eventos pode ser maior, pois não há registro de dados entre 1971 e 1982 e entre 2000 e 2010.

A figura 6 relaciona a série histórica com os valores máximos das cotas

de inundação e o tempo de retorno (TR) calculado por Kurek (2016). Apesar da ausência de registro de dados em 22 dos 79 anos da série histórica, constata-se que 29 dos 44 eventos registrados apresentaram tempo de retorno de 2 anos, com magnitude reduzida, totalizando 65,9 % dos eventos e alta probabilidade de ocorrência. Cinco eventos têm tempo de retorno de 5 anos (11,4%), 9 eventos têm tempo de retorno de 10 anos (20,4%) e 1 evento alcançou magnitude extrema, com tempo de retorno de 20 anos. Determinar o tempo de retorno para as diferentes cotas de inundação é fundamental para o planejamento municipal, gestão territorial, ações de enquadramento do município no contexto das cidades mais resilientes, prevenção de desastres, minimização dos efeitos das inundações e otimização dos gastos públicos.

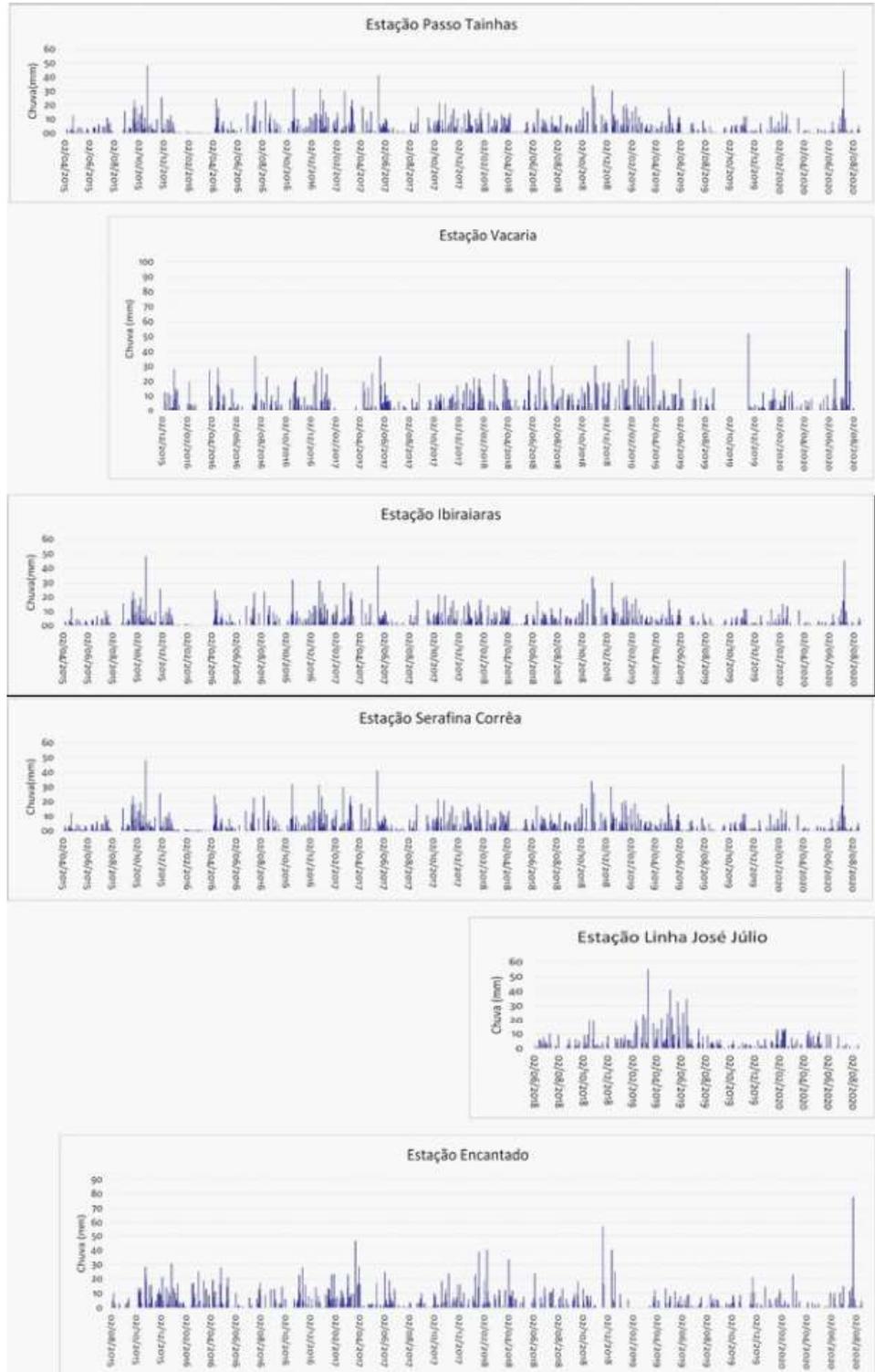
Figura 6. Série histórica das cotas máximas de inundação em comparação ao tempo de retorno (TR). Notar que a maioria dos eventos tem TR de 2 a 10 anos.



A comparação dos dados de precipitações dos últimos 5 anos nas 6 estações a montante de Encantado é mostrada na figura 7. Os picos de 5 estações apresentam comportamento semelhante, sendo que apenas a Estação Linha José Júlio não exibe um pico de chuva no dia 08 de julho. Os dados da última inundação mostram um pico de precipitação na Estação Passo Tainhas, de 45 mm, às 3:00 horas a.m, e outro pico de 40.8 mm às 5 horas a.m do dia 08 de julho de 2020. Na estação Vacaria, observa-se um pico de 54.2 mm às 5 horas a.m do dia 06 de julho e um pico de 96 mm às 19 horas do dia 08 de julho de 2020. Verifica-se que todas

as estações registraram chuvas no período de dois dias antes do dia 08 de julho; porém, não atingindo picos de 30 mm ou mais. O pico de precipitação na Estação Encantado ocorreu no dia 07 de julho, com registro de 77.6 mm, às 23 horas e 30 minutos; portanto, anterior ao evento de inundação de 8 de julho. O monitoramento do Rio Taquari em Encantado indicou o nível de 5,00 metros da cota de atenção no dia 06 de julho. Em 07 de julho, o rio atingiu a cota de alerta, marcando 9,00 metros por volta das 20:30h. E apenas três horas depois, o rio registrou 12,63 metros, já tendo ultrapassado a cota de inundação.

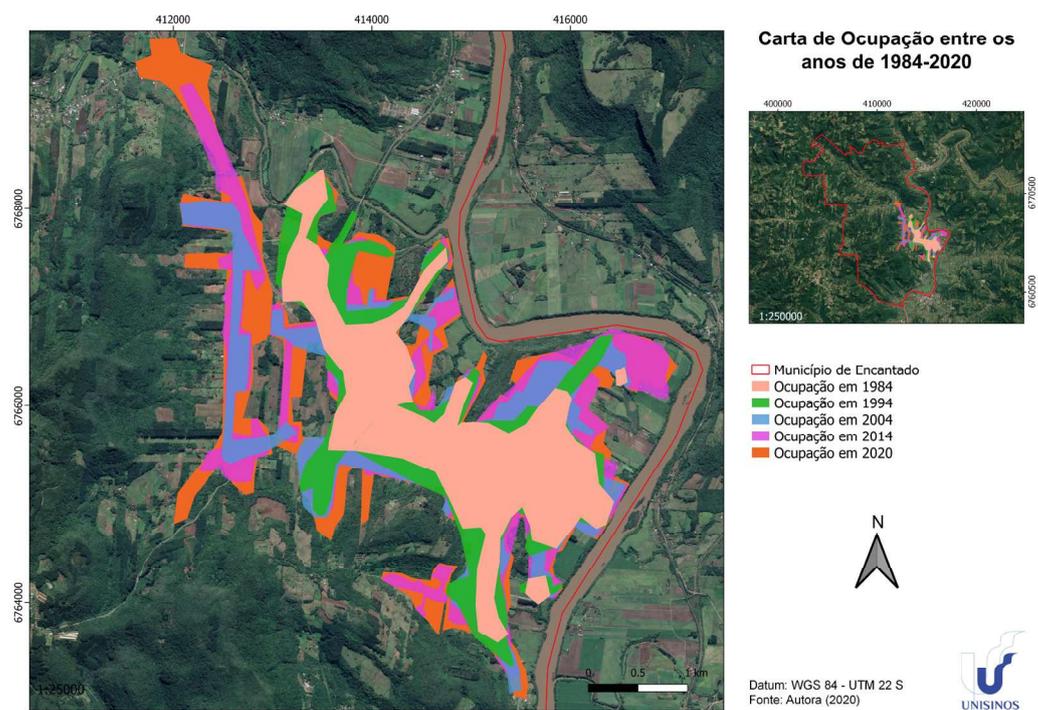
Figura 7 - Comparação dos dados de chuvas das 6 estações estudadas da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas considerando os últimos 5 anos. Destaque para os picos de precipitação em 5 das 6 estações em julho de 2020.



O crescimento da cidade de Encantado a partir de 2020 é mostrada pela sobreposição de polígonos da mancha urbana para os anos de 1984, 1994, 2004, 2014 e 2020 (Fig. 8). Fica evidente que a cidade teve uma expansão para áreas de cotas altimétricas mais baixas situadas próximas à margem do Rio Taquari, mesmo após a criação do Plano Diretor Municipal

em 1991. Isso potencializou os danos referentes às inundações, seja pela maior quantidade de pessoas habitando quanto pela quantidade maior de bens materiais instalados nessas áreas, mas também pelo fato do número de eventos de grande magnitude terem aumentado significativamente nesse intervalo de tempo.

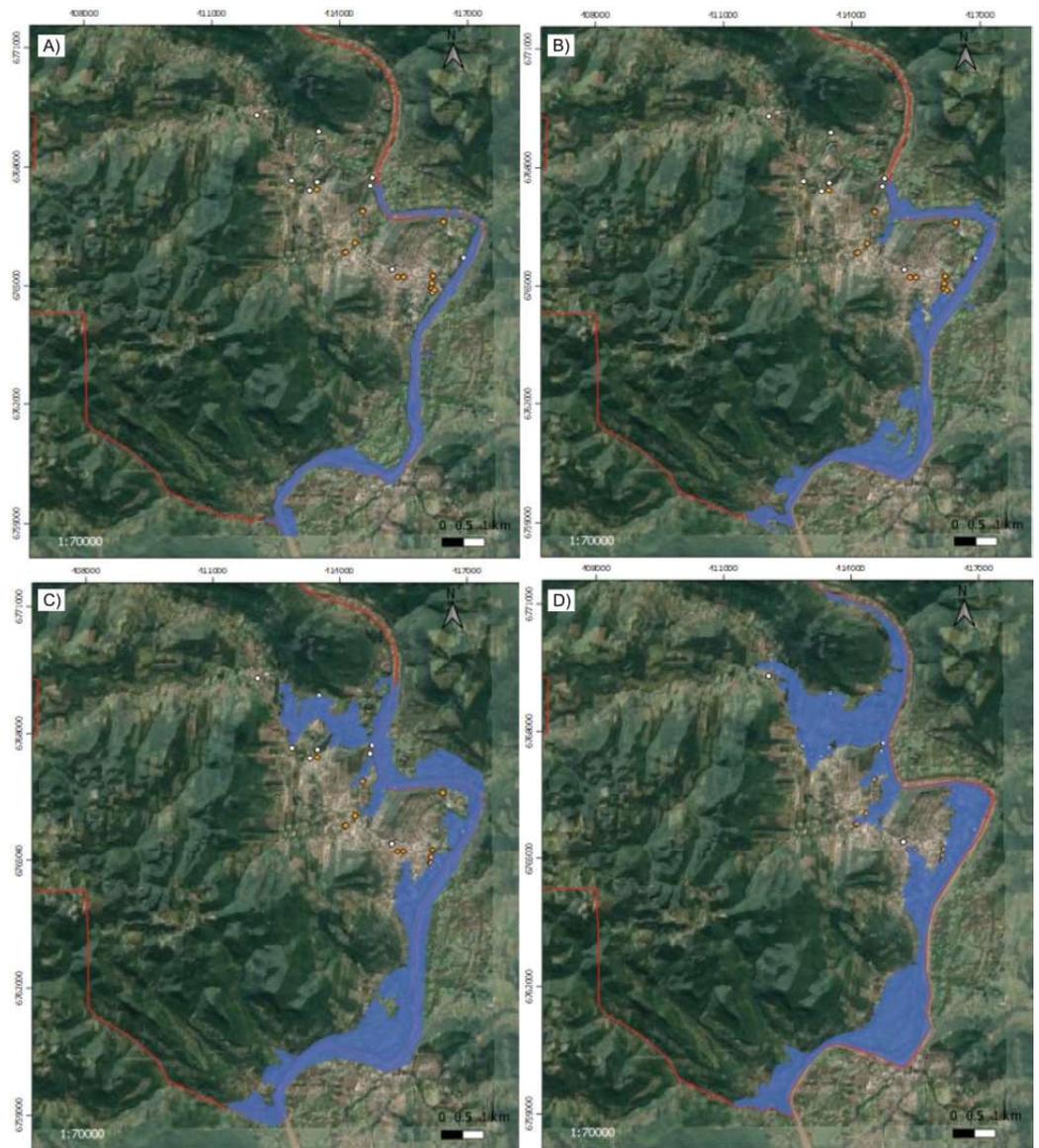
Figura 8. Mapa comparativo do crescimento da mancha urbana no período entre 1984 e 2020. Atentar para o crescimento urbano para áreas de cotas topográficas mais baixas próximas às margens do Rio Taquari



A projeção das cotas de inundação em uma carta temática de áreas propícias a inundação em Encantado mostra que a mancha de inundação máxima, relativa ao nível recorde

de 20,27 metros, é de 12,604 Km² (Fig. 9). Ou seja, aproximadamente 10% da área total do município está situada em área de risco de inundação conforme os dados da série histórica.

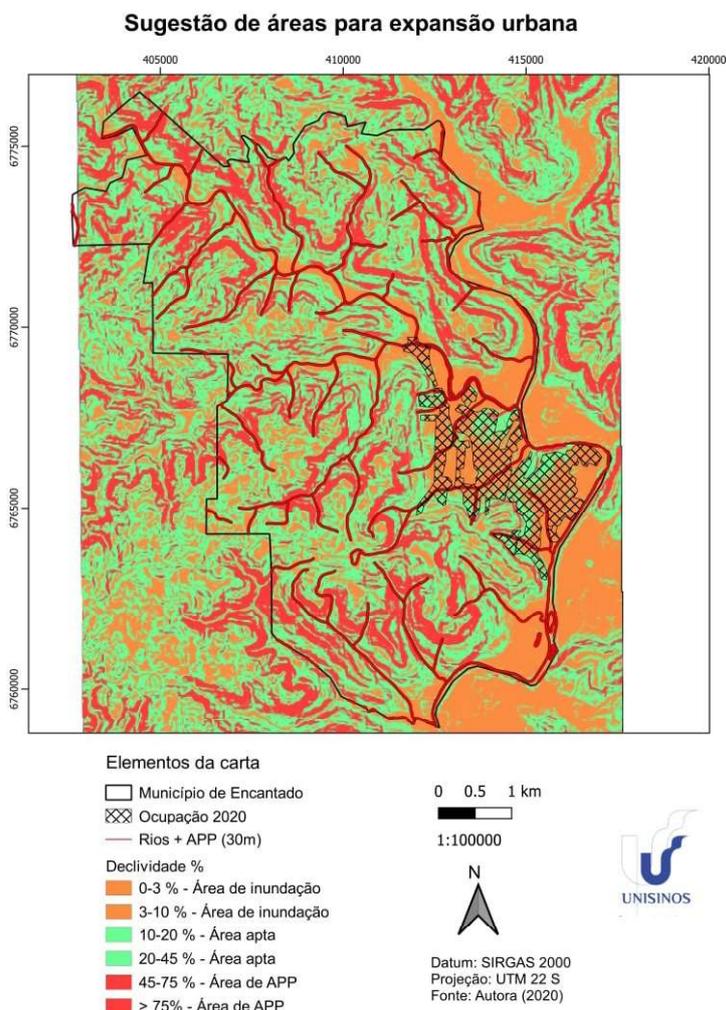
Figura 9. Projeção de inundação em Encantado para diferentes cotas de inundação. A) Cota de 11,00 m. B) Cota de 15,00 m. C) Cota de 17,00 m. D) Cota de 20,27 m (maior evento registrado até hoje).



A partir do cenário de projeção das manchas de inundação apresentado na figura 9 foi possível propor áreas apropriadas para a expansão da mancha urbana de Encantado (Fig. 10). Esse zoneamento territorial

considerou a área máxima de inundação com base na cota de 25,16 metros (relativa à TR de 100 anos), as áreas de proteção permanente (APP), como topos de morros e relevo com declividades maiores que 45%.

Figura 10. Proposta de zoneamento territorial para a expansão urbana de Encantado, considerando as áreas impróprias (vermelho), restritas (laranja) e aptas (verde).



DISCUSSÃO e CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dinâmica fluvial pressupõe inundação periódica das planícies adjacentes aos canais nos meses e anos com volume maior de precipitação. As características do meio físico e os condicionantes climáticos da área determinam a frequência dos eventos e a dinâmica

do escoamento superficial. No Rio Grande do Sul, há predominância de eventos de inundação nos meses de inverno e primavera, os mais chuvosos do ano, apesar de sua posição geográfica ser propícia ao encontro de massas de ar quente e fria em todas as estações do ano. O município de Encantado situa-se no baixo curso do Rio Taquari e sofre influência da chuva

precipitada a montante, que escoam superficialmente em grandes volumes em razão da saturação do solo e das características de declividade.

Considerando as características do solo na área de estudo, verifica-se a predominância de solos jovens e rasos, com rocha sã ou saprolito próximo ao nível do solo, de permeabilidade baixa e, portanto, com capacidade de armazenamento de água limitada. Solos mais profundos, com maior permeabilidade e maior capacidade de armazenamento de água ocorrem em áreas restritas, o que aumenta a suscetibilidade aos eventos de inundação.

Segundo os critérios adotados no trabalho, a ocorrência de 44 eventos de inundação ao longo de 79 anos de registros de dados na série histórica indica aumento do número de eventos e tendência de aumento nas cotas máximas de inundação nos últimos 20 anos. O aumento do número de desastres em todo o mundo e o número crescente de pessoas atingidas, especialmente nos centros urbanos, impõe que as ações de planejamento e gestão territorial sejam urgentes. As mudanças climáticas globais têm aumentado a frequência e a magnitude dos eventos extremos, o que indica a necessidade de reclassificação das áreas de risco em relação aos cálculos projetados com dados antigos. Por outro lado, percebe-se nitidamente o descumprimento das ações previstas nos instrumentos de gestão territorial, a exemplo das leis ambientais e dos planos diretores municipais, o que causa perdas sociais e econômicas aos municípios e expõe as pessoas a situações iminentes de risco. Um exemplo disso foi a constatação do crescimento de Encantado em regiões de cotas altimétricas mais baixas

desde 1984, portanto mais sujeitas aos efeitos das inundações, mesmo com as diretrizes estabelecidas no plano diretor municipal de 1991.

Um aspecto relevante no evento de inundação de 08 de julho de 2020 foi a ineficácia do Sistema de Alerta (SACE), que não previu o evento e, conseqüentemente, não emitiu os alertas hidrológicos. Com isso, a Defesa Civil e demais órgãos competentes não conseguiram alertar a população e tomar as ações preventivas e mitigadoras necessárias para a preservação de vidas e redução de perdas materiais. A simples observação dos dados históricos e a recorrência de eventos a intervalos regulares de 18 a 20 anos indica que havia grandes possibilidades de ocorrência de um evento de grande magnitude entre 2020 e 2021. Destacam-se também a ocorrência de um ciclone-bomba dias antes na região sul do Brasil, que provocou chuvas localizadas e intensas; o período do ano propenso a grandes volumes de precipitação; o registro de dados de precipitação em todas estações pluviométricas a montante, disponível *online* no site da Agência Nacional de Águas; o grau de saturação de água no solo, que favorecia o escoamento superficial e os picos de chuvas elevados nas estações Passo Tainhas e Vacaria. A análise integrada desses dados pode ser feita de maneira rápida e simples e indicaria a iminência de um evento de inundação de magnitude grande ou extrema.

Constatou-se ainda que o plano diretor do município precisa ser revisto e atualizado, pois prevê cotas de inundação desatualizadas em relação aos impactos gerados pelos últimos eventos de inundação. Esse trabalho apresenta uma carta

de áreas propícias para a futura expansão da mancha urbana baseada em características do meio físico e aspectos ambientais. O zoneamento proposto considerou uma classificação baseada em áreas impróprias, restritas e aptas. O município de Encantado necessita estudos permanentes para ter o diagnóstico ambiental como suporte às ações de planejamento e gestão territorial integradas ao conceito de cidades mais resilientes. Assim, será possível instrumentalizar o poder público e a defesa civil para monitorar e emitir alertas à população, promover ações de evacuação das áreas atingidas e diminuir as perdas sociais e econômicas causadas pela recorrência histórica dos eventos de inundação. Essas medidas são de natureza não-estrutural e, portanto, de custo mais baixo e com resultados satisfatórios na prevenção de desastres.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), à Agência Nacional de Águas (ANA) e à Defesa Civil de Encantado pela disponibilização de dados e informações sobre as inundações. SDB agradece a todos os moradores de Encantado que se dispuseram a conversar e relatar o histórico de eventos de inundação no município. FMWT agrade o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – proc. 311204/2017-1). Jorge Villegas-Martins e German Patarroyo revisaram a versão em espanhol do resumo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS

ÁGUAS (ANA) (Brasil). Rede Hidrometeorológica Nacional. Sistema HIDRO – Telemetria. Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília, DF: ANA, [2020]. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology, Massachusetts, USA*. v. 47, n. 2-4, p. 107-124, 2002.

ALHEIROS, M. M. Gestão de riscos geológicos no Brasil. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo*, v. 1, n. 1, p.109-122, nov. 2011.

ALVES, L.M.; CHADWICK, R.; MOISE, A.; BROWN, J.; MARENGO, J.A. Assessment of rainfall variability and future change in brazil across multiple timescales. *International Journal of Climatology*, v. 32, p. joc.6818, 2020.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS; ABGE; PMRJ; SMO; GEORIO, 1992. v. 2, p. 721-733.

BERLANGA, R. R.; TIBURCIO, E. G.; FLORES, A. S.; TANUS, C. F. U. Guía de Resiliência Urbana. México. 2016. Disponível em: <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/guia-de-resiliencia-urbana-2016>. Acesso em: 25 out. 2020.

BERTONE, P.; MARINHO, C. Plano de Gestão de Riscos e Resposta

- a Desastres Naturais - Visão do Planejamento. Brasília, DF. VI Congresso CONSAD de Gestão Pública, n. 21, p. 1-24, abr. 2013. Disponível em: <http://www.sgc.goias.gov.br/upload/arquivos/2013-12/gestao-de-riscos-e-resposta-a-desastres-naturais.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- BRASIL. Secretaria de Governo da Presidência da República. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Presidência da República, [2017]. Disponível em: <http://www4.planalto.gov.br/ods/publicacoes/apresentacao-ods-17-objetivos-e-169-metas>. Acesso em: 22 out. 2020.
- BITAR, O. Y. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico): nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16588/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 mar. 2020.
- BRASIL. Diário Oficial da União. Órgão: Ministério da Justiça e Segurança Pública/Secretaria Nacional de Segurança Pública. Portaria Nº 2, de 3 de Janeiro de 2020. Cria e institui o Grupo de Resposta a Desastres (GRD). Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/x.p?data=08/01/2020&jornal=515&pagina=29>. Acesso em: 30 jun. 2020.
- BOMBASSARO, M.; ROBAINA, L. E. de S. Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. Revista Geografias. Belo Horizonte, 06(2) 69-86, jul./dez. 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13297>. Acesso em: 01 abr. 2020.
- BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; QUEVEDO, R. P.; SIRÂNGELO, F. Suscetibilidade a inundações no município de Encantado/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 18., 2015, João Pessoa. Anais eletrônicos [...]. INPE, abr. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321543802_Suscetibilidade_a_inundacoes_no_municipio_de_EncantadoRS. Acesso em: 16 abr. 2020.
- BRASIL. Câmara dos Deputados. Legislação Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 31 de mar. 2020.
- CASTRO, A. L. C. de. Manual de desastres. Desastres naturais. Brasília, v. I. 2003. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-41340/manual-de-desastres--desastres-naturais>. Acesso em: 21 abr. 2020.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). [Brasília] 04 out. 2018. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/estudo-da-cnm-mostrado>

- no-bom-dia-brasil-aponta-r-250-bilhoes-de-gastos-com-desastres. Acesso em: 01 jul. 2020.
- 17 mar. 2020.
- COPELLO, C. Desmoronamento destrói casas e desaloja famílias em Encantado, RS. *In: G1: RS*. [São Paulo], 19 set. 2012. Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2012/09/desmoronamento-destrui-casas-e-desaloja-familias-em-encantado-rs.html>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- FERREIRA, E. R.; BOTH, G. C. Estudo das enchentes no Vale do Taquari: causas e propostas de controle. Lajeado: Univates, 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/84170>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- CPRM. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2008.
- FERRI, G. A. A história da Bacia hidrográfica Taquari-Antas. 1. ed. Lajeado: Editora Univates, 2012. Disponível em: <https://docs.google.com/file/R4bhqGGVkbVQ2REFRR2hkZGc/edit>. Acesso em: 31 jul. 2020.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Classes de declividade, 1979. Brasília. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/sesmaria/MAPA-SESMARIA-EMBRAPA-90-60.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2020.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Estatísticas do século XX. Cavararo, Roberto. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=237312>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- ENCANTADO. Lei nº 1.566/91, de 30 de dezembro de 1991. Institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município de Encantado e dá outras providências. Encantado: Câmara Municipal, 1991. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-encantado-rs>. Acesso em: 12 out. 2020.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Encantado, RS: panorama: população. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/encantado/panorama>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- ENCANTADO. Prefeitura Municipal. Enchente cheias do Rio Taquari obrigam moradores a deixarem suas residências. Encantado: Prefeitura Municipal, 20 out. 2016. Disponível em: <https://www.encantado-rs.com.br/site/noticia.php?id=3667>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- GÜNTER, W. M. R.; CICOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. Desastres: múltiplas abordagens e desafios. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153097/epubcfi/6/2%5B%3Bvnd.vst.dref%3Dcover%5D!/4/8%400:0>. Acesso em: 24 out. 2020.
- ENCANTADO. Prefeitura Municipal. Economia. Encantado: Prefeitura Municipal [2020?]. Disponível em: <https://www.encantado-rs.com.br/site/municipio.php?id=7>. Acesso em
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). CBERS-3 e 4. [São

- Paulo]: INPE, 5 fev. 2018. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cbbers3-4.php>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- KUINCHTNER, A; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite¹. *Série: Ciências Exatas*, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001. Disponível em: <https://pergamum.unifra.br/index.php/disciplinarumNT/article/download/1136/1077>. Acesso em: 16 maio 2020.
- KUREK, R. K. M. Análise das Inundações no Vale do Taquari/RS como Subsídio à Elaboração de um Modelo de Previsão. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016*. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7908/KUREK%2c%20ROBERTA%20KARINNE%20MOCVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 05 ago. 2020.
- LACERDA, F.; NOBRE, P. Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s. l.], n. 3, 14-17, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322347589_AQUECIMENTO_GLOBAL_CONCEITUACAO_E_REPERCUSSOES SOBRE_O_BRASIL. Acesso em: 28 mar. 2020.
- LIMA, L. M. M. de. Mapeamento da suscetibilidade a inundação na bacia hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre/RS. 2010. *Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFRGS, Porto Alegre., 2010*. 174p. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25554/000754214.pdf?...1>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- MARCUZZO, F. F. F. Mapas e opções de divisão territorial do Estado do Rio Grande do Sul por Bacias Hidrográficas. SGB/CPRM- Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre/RS. 2018. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/19906/2/cbg2018_mapas_opcoes_poster.pdf. Acesso em: 22 jun. 2020.
- MEOTTI, B. D.; CHIARELLI, L. M. A. Resiliência urbana: Riscos e vulnerabilidades no Pontal da Barra em Pelotas [RS]. *In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO*, 11.; 2019. Pelotas. *Anais eletrônicos [...]* Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufpel.edu.br/handle/prefix/6092>. Acesso em: 24 out. 2020.
- MOLION, L. C. B. Aquecimento Global: Uma visão crítica. *Revista Brasileira de Climatologia*. ISSN: 1980-055X. [s. l.], ago. 2008. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25404>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- OLIVEIRA, G. G. de; GUASSELLI, L. A.; QUEVEDO, R. P.; RUIZ, L. F. C.; BRESSANI, L. A.; RIFFEL, E. S. Identificação e análise de áreas suscetíveis a fluxos de detritos na bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. *Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v. 45, 2018*. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/88685/pdf>. Acesso em: 03 maio 2020.

- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N.J.C.; RAMOS, A.M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 20, p. n. 14307, 2020.
- NAÇÕES UNIDAS (ONU). Acelerando as transformações para a Agenda 2030 no Brasil. [S. l., 2020?]. Disponível em: <http://www.agenda2030.com.br/sobre/>. Acesso em: 26 out. 2020
- NAÇÕES UNIDAS (ONU). Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Brasília, DF: Nações Unidas, c2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 out. 2020.
- PEIXOTO, Carlos Augusto Brasil; LAMBERTY, Débora. Setorização de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Encantado, Rio Grande do Sul. [Porto Alegre]: CPRM, 2019. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20097>. Acesso em: 24 mar. 2020.
- PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; FREITAS, C.G.L.; DINIZ, N.C. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O. Y. (Coord.). Curso de Geologia Aplicada ao meio ambiente. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1995. Cap. 4, p. 187-202.
- RECKZIEGEL, B. W.; ROBAINA, L. E. de S.; OLIVEIRA, E. L. de A. Riscos geológico-geomorfológicos: revisão conceitual. *Ciência e Natura*, UFSM, Santa Maria, 27 (2): 65 - 83, 2005. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/9679>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- RECKZIEGEL, B. W. Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) Centro de Ciências Naturais e Exatas Programa de Pós-Graduação em Geografia. Santa Maria -RS. 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/9268>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: Uma revisão de literatura. *Boletim Goiano de Geografia (Online)*. Goiânia, v. 36, n. 2, p. 285-101, mai./jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v36i2.42796>. Acesso em: 06 abr. 2020.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev., ampl. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Sistema de Alerta de Eventos Críticos – SACE. Bacias monitoradas: Bacia do Rio Taquari - apresentação. Rio de Janeiro: CPRM, [2020?]. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/sace/index_

- bacias_monitoradas.php#. Acesso em: 06 abr. 2020.
- SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. de. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 2, p. 79-97, 2012. Disponível em: <https://www.abge.org.br/volume-2-n-1>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. Desastres naturais: conhecer para prevenir. (org.) Lídia Keiko Tominaga, Jair Santoro, Rosângela do Amaral, 3 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. Disponível em: http://www.sidec.sp.gov.br/defesacivil/media/OSDownloads/1438375861_DesastresNaturais.pdf. Acesso em: 30 mar. 2020.
- TUCCI, C. E. M. Gestão da drenagem urbana. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48). Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/38004-gestao-drenagem-urbana>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.). Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. Disponível em: <https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2020.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNISDR). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Risk and poverty in a changing climate*. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2009>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- UNITED NATIONS. Goal 11: make cities inclusive, safe, resilient and sustainable. New York: United Nations, [2020?]. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>. Acesso em: 22 out. 2020.
- YOUNG, A.F.; MARENCO, J.A.; MARTINS COELHO, J.O.; SCOFIELD, G.B.; OLIVEIRA SILVA, C.C.; PRIETO, C.C. The role of nature-based solutions in disaster risk reduction: The decision maker's perspectives on urban resilience in São Paulo state. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 39, p. 101219, 2019.
- ZUQUETTE, L.V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. São Carlos, SP, 1987. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-19092019-101848>. Acesso em: 09 jun. 2020.
- ZUQUETTE, L. V. Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico: Fundamentos e Guia para elaboração. São Carlos, SP, 1993. Volume II. Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo/USP. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-27092019-143236>. Acesso em: 09 jun. 2020.
- ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. *Cartografia geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.