



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

MÁSTER EM CIUDAD Y ARQUITECTURA SOSTENIBLES

**SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ESTRATEGIA
DE ADAPTACIÓN A LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO:
GESTIÓN DE INUNDACIONES URBANAS EN BELO HORIZONTE,
BRASIL**

Amanda Granha Magalhães Gomes e Silva

Sevilla

2023

Amanda Granha Magalhães Gomes e Silva



**SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ESTRATEGIA
DE ADAPTACIÓN A LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO:
GESTIÓN DE INUNDACIONES URBANAS EN BELO HORIZONTE,
BRASIL**

Trabajo de Fin de Máster en Ciudad y
Arquitectura Sostenibles en la Escuela
Técnica Superior de Arquitectura,
Universidad de Sevilla.

Directores:

Emilio José Mascort Albea
Domingo Sánchez Fuentes
Sergio Andrés Salazar-Galán

Sevilla

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

2023

AGRADECIMIENTOS

Elegir una carrera, para muchos, puede ser un camino de dudas y cambios a lo largo de toda la vida. En mi caso, trabajar con la sostenibilidad siempre ha sido un camino natural a seguir. Así que, en 2022, como forma de ampliar las posibilidades de mi trayectoria profesional, busqué en el mundo académico una manera de profundizar en temas de gran interés para mí: la renaturalización de las ciudades y la resiliencia climática. La experiencia de estudiar un máster fue mucho más allá de lo que podía imaginar. Este trabajo es el resultado final tangible de un trayecto de ocho meses de mucho aprendizaje en un entorno diverso y con profesores altamente cualificados que, a través de sus clases, pretendían guiarnos en el camino de la creación de ciudades y territorios más sostenibles.

Me gustaría dar las gracias a mis padres, Renata y Renato, por su apoyo incondicional a mi decisión desde el principio. A todos los demás familiares y amigos que siempre me han animado con entusiasmo a seguir mis sueños. A mis directores Emilio y Domingo, que me guiaron con maestría en la construcción del discurso, y a mi director Sergio, que con sus conocimientos fue fundamental para la realización de la parte práctica de este estudio. A la *Prefeitura de Belo Horizonte/DGAU* y GEASU, a través de sus representantes Úrsula, Mauriluci, Fernando y Sônia, y a la Prefeitura de Contagem en la figura de Robson y de la Superintendencia de Geoprosesamiento, por su disponibilidad y atención en el fornecimiento de datos. A Deyvid Rosa por compartir informaciones relevantes sobre su investigación en la misma área de estudio. A mis compañeros de máster que compartieron este trayecto conmigo tanto en los momentos alegres como en los difíciles, motivándonos, y que ahora los llevo como amigos para toda la vida. Ahora miro atrás con sentimientos de nostalgia, plenitud y gratitud por lo vivido.

Una de las primeras y más impactantes frases que escuché en mi época de estudiante de grado fue sobre la importancia de devolver a la sociedad lo que invertía en los estudiantes para poder tener la educación de calidad y gratuita de una universidad pública de renombre. Casi diez años después, tengo la oportunidad de volver a un ambiente así, esta vez con una experiencia internacional extremadamente enriquecedora. Ahora, ha llegado el momento de devolver una vez más toda la inversión realizada, dedicándome a la agenda de la sostenibilidad, pero esta vez centrándome en la construcción de un mundo más resiliente frente al cambio global.

AGRADECIMENTOS

A escolha de uma carreira, para muitos, pode representar uma jornada de dúvidas e mudanças ao longo da vida. No meu caso, trabalhar com sustentabilidade sempre foi um caminho natural a ser seguido. Dessa forma, em 2022, como forma de ampliar as possibilidades da minha jornada profissional, busquei na academia uma forma de aprofundar em temas de grande interesse meu: renaturalização das cidades e resiliência climática. A experiência de realizar um mestrado foi muito além do que eu poderia imaginar. Esse trabalho é o resultado final tangível de uma jornada de oito meses de muito aprendizado junto a um ambiente diverso e professores altamente capacitados que, através de suas aulas, visaram nos guiar na jornada de criação de cidades e território mais sustentáveis.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Renata e Renato pelo apoio incondicional às minhas escolhas desde sempre. A todos os demais membros familiares e amigos que sempre me incentivaram com entusiasmo a seguir meus sonhos. Aos meus caros orientadores Emilio e Domingo, que com experiência me guiaram na construção da narrativa, e ao orientador Sergio que com seu conhecimento foi fundamental para o prosseguimento desse estudo. A PBH (DGAU e GEASU), através de seus representantes Úrsula, Mauriluci, Fernando e Sônia, e a Prefeitura de Contagem na figura do Robson e Superintendência de Geoprocessamento, pela disponibilidade e atenção no fornecimento de dados. A Deyvid Rosa pelo compartilhamento de informações relevantes sobre suas pesquisas com a mesma área de estudo. Aos meus colegas de mestrado que compartilharam comigo essa jornada nos momentos alegres e tristes, nos motivando a dos quais levo amigos para a vida inteira. Agora olha para trás com sensações mistas de nostalgia, realização e gratidão pelo o que foi vivido.

Uma das primeiras, e mais marcantes, frases que escutei na minha graduação foi sobre a importância de retornar para a sociedade o que ela estava investindo nos alunos para termos a educação de qualidade e gratuita de uma universidade pública de renome. Quase dez anos depois, tenho a oportunidade de retornar para um ambiente assim e, dessa vez, em uma experiência internacional extremamente enriquecedora. Agora, chegou a hora de mais uma vez retornar todo o investimento realizado, me dedicando à agenda de sustentabilidade, mas dessa vez, com foco na construção de um mundo mais resiliente frente às mudanças globais.

RESUMEN

El cambio climático ha evidenciado los desequilibrios metabólicos derivados de un intenso proceso histórico de urbanización con visiones disociadoras entre la ciudad y el entorno natural. Como consecuencia de ello, los centros urbanos se enfrentan a diversos retos que se han visto intensificados por los cambios globales derivados de la alteración del clima y que tienden a hacerse aún más frecuentes cuando se analizan las proyecciones globales de futuros escenarios climáticos.

La cuenca hidrográfica de Ribeirão Arrudas, situada en Belo Horizonte – Minas Gerais (MG), es uno de estos territorios altamente urbanizados que sufre este tipo de desafíos, como inundaciones frecuentes. Estas son principalmente el resultado de la falta de una visión holística del drenaje del territorio, la elevada impermeabilización del suelo y la intensificación de los fenómenos de precipitaciones extremas. Cíclicamente, durante la temporada de lluvias la cuenca, junto con su infraestructura urbana y su población, sufre impactos materiales e inmateriales. En escenarios donde ganar resiliencia a través de los entornos urbanos parece ser la única opción frente a los desafíos futuros, conceptos como la adaptación climática territorial ganan protagonismo.

Existen diversas formas de adaptar el territorio, pero esta investigación apuesta por aquellas que pasan por renaturalizar el tejido urbano. Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) engloban la adopción de medidas para proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, al tiempo que aportan beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad, y actúan como herramientas de adaptación al clima. Así, considerando un escenario realista, se propone intervenir en cerca del 7% del área de la cuenca del Ribeirão Arrudas mediante la implantación de SbN para controlar las inundaciones frente al cambio climático.

Considerando todos estos factores, se ha analizado el comportamiento de la cuenca en relación con sus caudales máximos (crecidas) para tres condiciones con diferentes características climáticas: periodo histórico (1), escenario de proyecciones regionales de cambio climático para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 (2) escenario de proyecciones regionales de cambio climático SSP2-4,5 y SSP5-8,5 considerando la implantación de cubiertas verdes y jardines de lluvia como SbN (3). Los resultados fueron generados para siete puntos distribuidos en la cuenca (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7). Se observó que las SbN son más efectivas para crecidas de periodo de retorno (PR) bajo - próximo a 1 - y muy altos - mayores de 500, y menos efectiva para crecidas de PR intermedio. Para crecidas de PR igual a 1 año la mayor reducción de caudal máxima encontrada fue 4,6% en P6, para el escenario SSP2-4,5 o 5,3% para el escenario SSP5-8,5. Ya para crecidas de PR igual a mil años, las mayores reducciones fueron en P6, con 5,1% para el escenario SSP2-4,5, y en P4 con 4,5% para SSP5-8,5. Estos datos se hacen relevantes considerando que las crecidas de PR de un año son muy frecuentes y que las con PR de 1000 años, aunque poco probables, tienen una magnitud y poder destructivo muy relevante.

Aunque los porcentajes de reducción de caudales máximos encontrados no son tan elevados, sí son importantes si tenemos en cuenta que estas reducciones pueden marcar la diferencia a la hora de evitar que los caudales máximos instantáneos se desborden y produzcan inundaciones. Cuando se evitan las inundaciones, también se evitan todos los daños y costes que suponen las pérdidas materiales y humanas que se producen con frecuencia en la cuenca del Arrudas.

Palabras clave: Ribeirão Arrudas, cambio climático, resiliencia urbana, inundaciones, drenaje, ciudades sostenibles, infraestructura verde.

RESUMO

As mudanças climáticas vêm realçando os desequilíbrios metabólicos resultantes de um intenso processo histórico de urbanização com visões dissociativas entre cidade e meio natural. Como resultado, os centros urbanos enfrentam diversos desafios que vêm se intensificando pelas mudanças globais resultantes das alterações climáticas e que tendem a ser ainda mais frequentes quando analisadas as projeções globais para cenários climáticos futuros.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas, localizada em Belo Horizonte – Minas Gerais (MG), é um desses territórios altamente urbanizados que sofre com tais desafios, como inundações frequentes. Estas são resultantes, principalmente, da ausência de visão holística de drenagem sobre o território, alta impermeabilização do solo e intensificação de eventos extremos de precipitação. Ciclicamente, durante a temporada de chuva a bacia, junto com sua infraestrutura urbana e sua população, sofre com impactos materiais e imateriais. Em cenários onde o ganho de resiliência pelos meios urbanos parece ser a única opção frente aos desafios futuros, conceitos como adaptação climática do território ganham destaque.

Diversas são as maneiras de adaptar o território, mas essa investigação aposta por aquelas que permeiam a renaturalização do tecido urbano. As Soluções baseadas na Natureza (SbN) englobam a implementação de ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, ao mesmo tempo em que proporcionam benefícios para o bem-estar humano e a biodiversidade, e atuam como ferramentas de adaptação climática. Dessa maneira, considerando como um cenário realista, se propõe a intervenção em cerca de 7% da área da bacia do Ribeirão Arrudas, através da implementação de SbN para controle de inundações frente as mudanças climáticas.

Considerando todos esses fatores, se analisou o comportamento da bacia em relação às suas vazões máximas para três condições com diferentes características climáticas: período histórico (1), projeções regionais de mudanças climáticas para SSP2-4.5 e SSP5-8,5 (2) projeções regionais de mudanças climáticas SSP2-4,5 e SSP5-8,5 considerando a implementação de telhados verdes e jardins de chuva como SbN (3). Os resultados foram gerados para sete pontos distribuídos na bacia (P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7). Observou-se que as SbN são mais efetivas para vazões de período de retorno (PR) baixo – próximo a 1 – e muito altos – maiores de 500, e menos efetiva para vazões de PR intermediário. Para vazões de PR igual a 1 ano a maior redução de vazão máxima encontrada foi 4,6% em P6, para o cenário SSP2-4,5 ou 5,3% para o cenário SSP5-8,5. Já para vazões de PR igual a mil anos, as maiores reduções foram em P6, com 5,1% para o cenário SSP2-4,5 e em P4 com 4,5% para o cenário SSP5-8,5. Esses dados se fazem relevantes considerando que vazões de PR de um ano são muito frequentes e as com PR de 1000 anos, apesar de pouco prováveis, tem uma magnitude e poder destrutivo muito relevante.

Embora as porcentagens de reduções de pico de vazão encontradas não sejam tão altas, elas são importantes se levarmos em conta que essas reduções podem fazer a diferença na prevenção de picos de vazão instantâneos que transbordam e causam inundações. Quando as inundações são evitadas, todos os danos e custos em termos de perdas materiais e humanas que ocorrem com frequência na bacia do Arrudas também são evitados.

Palavras-chave: Ribeirão Arrudas, mudanças climáticas, resiliência urbana, inundações, adaptação, drenagem, cidades sustentáveis, infraestrutura verde.

ABSTRACT

Climate change has highlighted the metabolic imbalances resulting from an intense historical process of urbanization with dissociative visions between the city and the natural environment. As a result, urban centers face various challenges that have been intensified by global changes resulting from climate extremes and that tend to become even more frequent when analyzing global projections for future climate scenarios.

The Ribeirão Arrudas watershed, located in Belo Horizonte – Minas Gerais (MG), is one of these highly urbanized territories that suffers from such challenges, such as frequent flooding. Those are mainly the result of the absence of a holistic drainage vision for the territory, high soil sealing and intensification of extreme precipitation events. Cyclically, during the rainy season, the watershed, along with its urban infrastructure and population, suffers material and immaterial impacts. In scenarios where gaining resilience through urban environments seems to be the only option in the face of future challenges, concepts such as territorial climate adaptation are gaining relevance.

There are many ways of adapting the territory, but this research focuses on those that permeate the renaturalization of the urban fabric. Nature-based solutions (NbS) involve implementing actions to protect, sustainably manage and restore natural or modified ecosystems, while providing benefits for human well-being and biodiversity, and acting as a climate adaptation tool.

Considering all these factors, the behaviour of the basin in relation to its peak flows (floods) has been analysed for three conditions with different climatic characteristics: historical period (1), regional climate change projections scenario for SSP2-4.5 and SSP5-8.5 (2) regional climate change projections scenario SSP2-4.5 and SSP5-8.5 considering the implementation of green roofs and rain gardens as SbN (3). The results were generated for seven points distributed in the basin (P1, P2, P3, P4, P5, P6 and P7). It was observed that SbNs are most effective for low - close to 1 - and very high - greater than 500 return period (RP) floods, and less effective for intermediate RP floods. For floods of RP equal to 1 year, the highest maximum flow reduction found was 4.6% at P6 for the SSP2-4.5 scenario or 5.3% for the SSP5-8.5 scenario. Already for PR floods equal to 1,000 years, the largest reductions were in P6, with 5.1% for the SSP2-4.5 scenario, and in P4 with 4.5% for SSP5-8.5. These data are relevant considering that one-year RP floods are very frequent and that 1000-year RP floods, although unlikely, have a very significant magnitude and destructive power.

Although the percentages of peak flow reductions found are not so high, they are important if we take into account that these reductions can make a difference in preventing instantaneous peak flows from overflowing and producing floods. When flooding is prevented, all the damage and costs in terms of material and human losses that frequently occur in the Arrudas basin are also prevented.

Keywords: Ribeirão Arrudas, climate change, urban resilience, flooding, adaptation, drainage, sustainable cities, green infrastructure.

Contenido

RESUMEN	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE GRÁFICOS	11
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	13
1. Ruptura metabólica entre territorio y metrópolis	15
1.1. Motivación	15
1.2. Antecedentes	16
1.3. Estructura del trabajo	25
1.4. Relevancia de la investigación	26
1.4.1. <i>El proceso de urbanización y sus externalidades</i>	26
1.4.2. <i>Impacto del cambio climático sobre la disociación metabólica territorial</i>	29
1.5. Problemática del caso de estudio: inundaciones en la cuenca Arrudas	32
1.5.1. <i>Contexto General</i>	32
1.5.2. <i>Histórico de ocupación y transformación del territorio</i>	35
1.5.3. <i>Inundaciones y contexto actual de los cambios en la red de drenaje</i>	41
1.6. Objetivos	46
1.6.1. <i>Objetivo general</i>	46
1.6.2. <i>Objetivos específicos</i>	46
1.7. Metodología	47
2. Aproximación al cambio climático como fenómeno físico: escenarios previstos	60
2.1. Contexto histórico del cambio climático	61
2.2. Eventos climáticos extremos	64
2.2.1. <i>Temperatura</i>	65
2.2.2. <i>Precipitación</i>	65
2.2.3. <i>Inundaciones</i>	66
2.3. Tendencias del cambio climático con modelos de escala global	67
2.3.1. <i>En el calentamiento del planeta</i>	67
2.3.2. <i>En los riesgos por inundaciones urbanas</i>	72
2.4. Tendencias del cambio global con modelos de escala regional	76
3. Construcción de ciudades más resilientes ante las inundaciones	80
3.1. Adaptación como instrumento frente a los retos del cambio climático	82
3.2. SbN como tendencias de transformación urbana para adaptación climática	85

3.2.1.	<i>Cubiertas Verdes</i>	90
3.2.2.	<i>Pavimentos Permeables</i>	91
3.2.3.	<i>Humedales Artificiales, o Wetlands</i>	93
3.2.4.	<i>Trincheras de Inundación</i>	94
3.2.5.	<i>Celdas de Biorretención, o Jardines de Lluvia</i>	95
3.3.	Aplicaciones de las SbN por el mundo	96
3.3.1.	<i>China</i>	96
3.3.2.	<i>Corea del Sur</i>	97
3.3.3.	<i>Estados Unidos</i>	100
3.3.4.	<i>Holanda</i>	101
3.3.5.	<i>Mozambique</i>	102
3.3.6.	<i>Sri Lanka</i>	103
3.3.7.	<i>Vietnam</i>	104
4.	<i>Caracterización geofísica de la cuenca Arrudas frente a las inundaciones</i>	105
4.1.	Clima	106
4.2.	Geología	111
4.3.	Geomorfología	112
4.4.	Uso y ocupación del suelo	115
5.	<i>El futuro mediante premisas del cambio climático y adaptación con el uso de SbN</i> .	116
5.1.	Calibración automática y validación del modelo	117
5.2.	Simulación del período de referencia	122
5.3.	Simulación escenarios de cambio climático	124
5.4.	Simulación escenarios de cambio climático con SbN como estrategias de adaptación	127
6.	<i>Discusión de los resultados</i>	142
7.	<i>Conclusiones</i>	146
	REFERENCIAS	150
	ANEXO	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exposición a inundaciones en Belo Horizonte en 2016 y 2030	17
Figura 2: Capacidad de adaptación a las inundaciones en Belo Horizonte en 2016 y 2030	18
Figura 3: Cuenca del Rio das Velhas y sus respectivas UTE's	33
Figura 4: Localización de la cuenca del Ribeirão Arrudas en la RMBH.....	35
Figura 5: Ribeirão Arrudas en la región de Lagoinha a principios de los años 60	38
Figura 6: Representación temporal de la ocupación de la ciudad de Belo Horizonte	39
Figura 7: Ribeirão Arrudas en la Avenida Thereza Cristina tras el proyecto Boulevard Arrudas	40
Figura 8: Canal del Arrudas (a) y avenida adyacente (b) en el episodio de lluvias extremas del 19/01/2020	42
Figura 9: Vista aérea del canal Ribeirão Arrudas y de la Avenida Tereza Cristina durante el episodio de lluvias extremas del 19/01/2020	42
Figura 10: Cráter en la Avenida Tereza Cristina, junto a Arrudas, tras las lluvias extremas del 28/01/2020	43
Figura 11: Tipología de los cursos de agua.....	44
Figura 12: Metodología aplicada en etapas	47
Figura 13: Localización de la estación fluviométrica 24.....	50
Figura 14: Localización de la cuenca del río Arrudas en relación con CABra 657	54
Figura 15: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.....	58
Figura 16: Localización de embalses existentes, en construcción o por construir en el municipio de Belo Horizonte.....	59
Figura 17: Cinco SSP que representan diferentes combinaciones de desafíos para la mitigación y la adaptación	69
Figura 18: Proyección de precipitaciones intensas para cada escenario de calentamiento futuros.....	73
Figura 19: Cambios relativos en los valores medios y extremos a largo plazo de las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, entre los periodos histórico (1980-2013) y futuro (2070-2100; SSP2-4,5).....	79
Figura 20: Cambios relativos en los valores medios y extremos a largo plazo de las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, entre los periodos histórico (1980-2013) y futuro (2070-2100; SSP5-8,5).....	80
Figura 21: Representación esquemática de la variedad de tipos de SbN	88
Figura 22: Cubierta verde en el edificio del Banco do Brasil en Belo Horizonte	91
Figura 23: Pavimento permeable de tipo A: infiltración total.....	92
Figura 24: Pavimento permeable de tipo B: infiltración parcial	92
Figura 25: Pavimento permeable de tipo C: sin infiltración.....	93
Figura 26: Una sección de los humedales de Haikou, China	94
Figura 27: Trinchera de infiltración adoptada en el jardín.....	95
Figura 28: Ejemplo de un jardín de lluvia implantado en una zona urbana.....	96
Figura 29: Diseño gráfico de una ciudad esponja.....	97
Figura 30: Parte del río Cheonggyecheon restaurado.....	99
Figura 31: Albina Triangle como parte del proyecto Green Streets en Oregon, Estados Unidos	101
Figura 32: Las zonas verdes de Rotterdam.....	102
Figura 33: Parque urbano junto al río Chivere en la ciudad de Beira, Mozambique	103
Figura 34: Humedal preservado en el Parque del Humedal de Beddagana	104
Figura 35: Pot Plant House en Ho Chi Minh, Viatnan.....	105
Figura 36: Unidades geológicas de la cuenca del Ribeirão Arrudas.....	111

Figura 37: Unidades geomorfológicas de la cuenca del Ribeirão Arrudas.....	113
Figura 38: Mapa de altitud de la cuenca del Ribeirão Arrudas	114
Figura 39: Mapa de pendientes de la cuenca del Ribeirão Arrudas.....	115
Figura 40: Uso y cobertura del suelo.....	116
Figura 41: Cobertura y uso del suelo 2018.....	122
Figura 42: Distribución espacial de las cubiertas verdes planteadas.....	129
Figura 43: Distribución espacial de los jardines de lluvia planteados.....	130
Figura 44: Distribución espacial de las SbN planteadas	131
Figura 45: Configuración de cubierta verde considerada	132
Figura 46: Configuración de jardín de lluvia considerada	133
Figura 47: Distribución de los puntos de muestreo en la cuenca	134

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolución de la población brasileña 1872-2022	27
Gráfico 2: Curvas clave de la estación pluviométrica 24 generadas por HEC-RAS y SWMM, donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning	51
Gráfico 3: Variación de la temperatura superficial mundial (media anual) observada y simulada utilizando factores humanos y naturales y únicamente factores naturales (1850-2020)	63
Gráfico 4: Emisiones futuras anuales de CO2 para cada escenario SSP	70
Gráfico 5: Cambio de la temperatura superficial global relativa a 1850-1900 para cada escenario	71
Gráfico 6: Contribución para el calentamiento de la temperatura superficial global de diferentes emisiones, para cada escenario.....	72
Gráfico 7: Evolución de la temperatura media prevista en Brasil para cada escenario	74
Gráfico 8: Evolución de la precipitación prevista en Brasil para cada escenario	75
Gráfico 9: Temperatura Media Diaria Mensual Belo Horizonte Normais Climatológicas 1991-2020.....	107
Gráfico 10: Precipitación Total Media Mensual Belo Horizonte Normais Climatológicas 1991-2020.....	107
Gráfico 11: Comparación entre las normales climatológicas de los períodos 1931-1960, 1961-1990, 1981-2010 y 1991-2020 para la temperatura media en Belo Horizonte-MG.....	108
Gráfico 12: Comparação entre as normais climatológicas para os períodos de 1931-1960, 1961-1990, 1981-2010 e 1991-2020 para a precipitação mensal total em Belo Horizonte-MG	109
Gráfico 13: Precipitación total anual de 1931 a 2022 en Belo Horizonte	109
Gráfico 14: Análisis de la media móvil decenal de las intensidades máximas registradas considerando todas las duraciones de las precipitaciones	110
Gráfico 15: Comparativo Qobservado y Qsimulado en el proceso de calibración	120
Gráfico 16: Comparativo Qobservado y Qsimulado en el proceso de validación.....	121
Gráfico 17: Hidrograma para el periodo de referencia 1980-2013.....	123
Gráfico 18: Función de distribución de probabilidad de las crecidas	124
Gráfico 19: Hidrograma escenario SSP2-4,5 para 2015-2100	125
Gráfico 20: Hidrograma escenario SSP5-8,5 para 2015-2100	125
Gráfico 21: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia, los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5	126
Gráfico 22: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P1).....	135

Gráfico 23: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P2).....	136
Gráfico 24: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P3).....	136
Gráfico 25: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P4).....	137
Gráfico 26: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P5).....	137
Gráfico 27: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P6).....	138
Gráfico 28: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P7).....	138

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Cambios en la temperatura superficial global para cada escenario y período de tiempo	71
Tabla 2: Proyecciones del ciclo hídrico medio anual de cada escenario para medio y largo plazo	73
Tabla 3: Temperatura media prevista en Minas Gerais para cada escenario	75
Tabla 4: Precipitación prevista en Minas Gerais para cada escenario	75
Tabla 5: Medias climáticas diarias por mes y media anual basadas en las Normais Climatológicas 1991-2020 Belo Horizonte	106
Tabla 6: Caudales máximos anuales e instantáneos 2011-2023.....	119
Tabla 7: Métricas de la calibración y validación del modelo.....	120
Tabla 8: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con respecto al periodo de referencia por periodo de retorno	127
Tabla 9: Límites de filtrado, con sus respectivas superficies y número de polígonos, utilizados en la muestra de cubiertas verdes en la cuenca del Ribeirão Arrudas	128
Tabla 10: Comparación jardines de lluvia mapeados y simulados.....	130
Tabla 11: Área y número de polígonos de la implementación de SbN propuesta.....	131
Tabla 12: Coordenadas de los puntos de muestreo.....	135
Tabla 13: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P1)	139
Tabla 14: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P2)	139
Tabla 15: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P3)	140
Tabla 16: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P4)	140
Tabla 17: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P5)	141
Tabla 18: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P6)	141
Tabla 19: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P7)	142

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR4 – Fourth Assessment Report

AR6 – Sixth Assessment Report

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos

CABra – Catchments Attributes for Brazil

CBH Velhas – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas

CCNC – Comissão Construtora da Nova Capital

CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

DGAU – Diretoria de Gestão de Águas Urbanas

GHCNd – Global Historical Climatology Network daily

GI – Green Infrastructure

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICLEI – International Council for Local Environmental Initiatives

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IDA – International Development Association

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LID – Low-impact Development

MDT – Modelo Digital del Terreno

NAC – Núcleo de Alerta de Chuvas

NDCs – Nationally Determined Contributions

OODC – Outorga Onerosa do Direito de Construir

OUC – Operação Urbana Consorciada

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte

PMBC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PR – Período de Retorno

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

RPC – Representative Concentration Pathways

RegCM4 – Regional Climate Model version 4

SbN – Soluciones basadas en la Naturaleza

SCE-UA – Shuffled Complex Evolution – University of Arizona

SMOBI – Departamento Municipal de Obras e Infraestructura

SSP – Shared Socio-Economic Pathways

SWMM – Storm Water Management Model

UICN - Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

UNEP – Unep Nations Environment Programme

UTE – Unidade Territorial Estratégica

WRI – World Resources Institute

1. Ruptura metabólica entre territorio y metrópolis

1.1. Motivación

El interés por la naturaleza y sus fenómenos me acompaña desde hace mucho tiempo, y ha sido responsable de decisiones académicas y profesionales a lo largo de mi vida. Con la elección de la carrera de ingeniería ambiental mi mundo se abrió aún más a los grandes retos globales y oportunidades del tema medioambiental.

Fue también durante mi curso de graduación cuando tuve el primer contacto con el tema del urbanismo, más concretamente sobre sus intersecciones con la naturaleza y el concepto de *Water Sensitive Cities*. Me encantó visualizar cómo el medio urbano, en la actualidad tan alejado del medio natural, podía acercarse a él, y cómo las grandes ciudades podrían empezar a revalorizar y reintegrar sus cursos de agua en el paisaje urbano, a menudo junto con la creación de parques lineales. Además de los muchos beneficios socioambientales que eso podría aportar. Entre ellos se destacan los beneficios sociales de creación de espacios de calidad y de permanencia para las poblaciones de los núcleos urbanos, de forma que no sean necesarios grandes desplazamientos para que el contacto con la naturaleza sea posible. Sin embargo, fueron los beneficios medioambientales tangibles los que, en aquel momento y de nuevo en este trabajo, me guiaron a la hora de elegir el tema de estudio.

Por su proximidad territorial y relevancia dentro del territorio, se eligió como zona de estudio de mi trabajo de fin de grado la cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas. A lo largo del estudio se pretendió comprobar la hipótesis de que la reincorporación en el paisaje urbano de tramos que fueron canalizados del río puede generar beneficios climáticos urbanos. Así, el estudio se tituló: "*O impacto da descanalização e restauração de sistemas fluviais no microclima urbano: estudo de caso Ribeirão Arrudas, Belo Horizonte (MG)*"; y con la recogida de datos *in situ*, se pudo concluir que en los tramos donde el río estaba descubierto, la humedad era mayor y la temperatura menor, factores que están altamente correlacionados y que ayudan en un potencial mejor confort térmico (SILVA, 2019; SILVA; ASSIS, 2022).

El tema de la renaturalización de los medios urbanos siguió guiando mis opciones académicas. Por ello, a la hora de elegir un máster, busqué una intersección entre la

sostenibilidad, tema ampliamente conocido dentro de mi carrera y trayectoria profesional, y el urbanismo, tema que todavía quería profundizar.

Históricamente, la ciudad y la naturaleza se han ido alejando hasta llegar a un escenario de desequilibrio total a nivel territorial. Uno de los principales síntomas de ello en la actualidad son las inundaciones en el entorno urbano que acarrearán pérdidas materiales e inmateriales. Así, teniendo en cuenta el estudio desarrollado anteriormente, el deseo de profundizar en la dinámica territorial del área de drenaje, que afecta el territorio donde la ciudad de Belo Horizonte está ubicada, y cómo la renaturalización de este espacio puede ayudar en el logro de un reequilibrio metabólico, considerando también escenarios de cambio climático, se desarrolló este estudio. De este modo, espero aportar datos relevantes a las autoridades correspondientes que puedan servir de guía para el desarrollo de mejores soluciones urbanas para el presente y el futuro.

1.2. Antecedentes

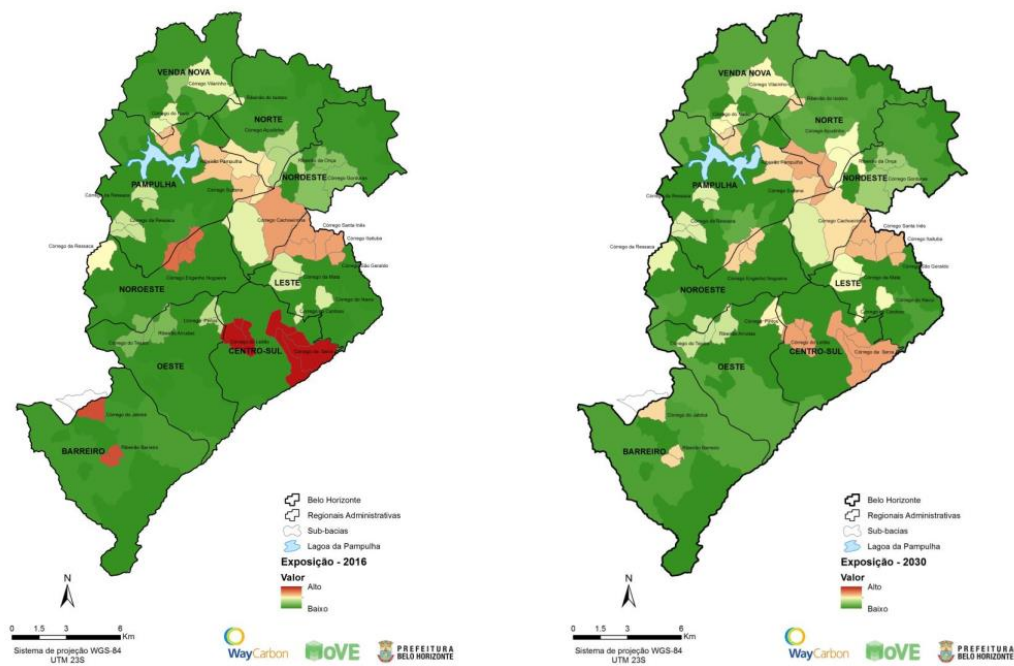
Un paso fundamental en el desarrollo de cualquier estudio es el reconocimiento de referencias teóricas previas correlacionadas. Estas pueden servir tanto como base para el desarrollo de una continuación de investigación existente, como complemento en la construcción de un marco teórico más amplio, capaz de ayudar en la toma de decisiones. Así, en este estudio, fueron levantadas referencias bibliográficas de investigaciones que se acerquen a los temas aquí tratados, ya que no fue posible encontrar estudios con el mismo exacto objeto de estudio para el mismo territorio. Además, también se traen algunos marcos prácticos gubernamentales que ayudan en la contextualización del área de estudio en lo que se refiere al uso de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en Belo Horizonte, ciudad en la que se encuentra la mayor parte de la cuenca de Ribeirão Arrudas.

Para el municipio de Belo Horizonte, existe un informe realizado por WayCarbon (2016) llamado *“Análise de Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas do Município de Belo Horizonte”*. Según el documento, el ayuntamiento utilizó los análisis de vulnerabilidad resultantes del estudio, considerando el escenario de 2016 y las proyecciones para el año 2030, para fundamentar su plan de adaptación al cambio

climático. La metodología adoptada fue la del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (AR4) (IPCC, 2007), que define el término vulnerabilidad como el resultado de los impactos generados por los índices de exposición climática y sensibilidad física sumados a la capacidad de adaptación del territorio. Las proyecciones climáticas se realizaron utilizando el modelo regional EtaCPTec (*Centre for Weather Forecasting and Climate Studies/National Institute for Space Research*) acoplado a los modelos globales HadGEM2-ES y MIROC5, y los impactos considerados fueron: inundaciones, deslizamientos, dengue y olas de calor. Aquí sólo se abordará el primero debido a su mayor correlación con el objeto de estudio de este documento.

A continuación, se muestran los mapas de exposición a las inundaciones teniendo en cuenta los datos climáticos medidos y proyectados (FIG. 1).

Figura 1: Exposición a inundaciones en Belo Horizonte en 2016 y 2030



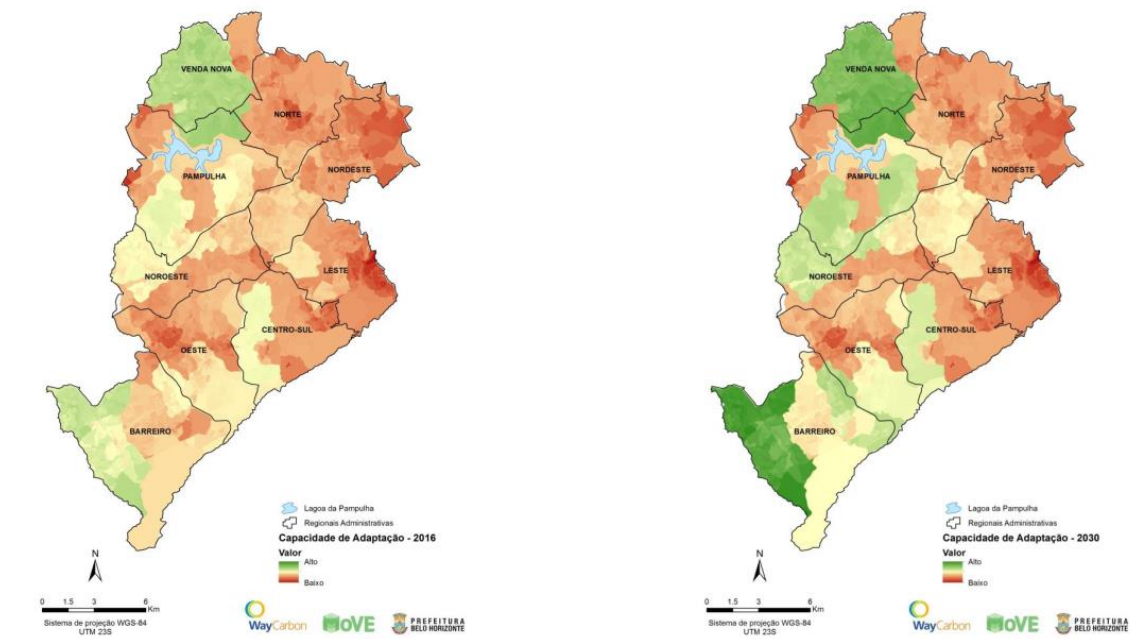
Fuente: WayCarbon (2016)

Grande parte de las zonas de mayor exposición se encuentran en subcuencas pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas, como: Córrego da Serra y Córrego do Leitão (Regional Centro-Sur); y Córrego do Jatobá y Ribeirão Barreiro (Regional Barreiro). Según WayCarbon (2016), las imágenes modelizadas muestran la probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación - basada en el patrón de

comportamiento de las precipitaciones en 2016 y simuladas hasta 2030 - asociada a los niveles de precipitación de riesgo (mm) de las alertas de emergencia para eventos de 1 hora. La modelización también lleva a la conclusión de que, aunque las inundaciones en 2030 sean menos frecuentes en algunas subcuencas, estos eventos en Belo Horizonte tienden a ser más intensos, debido a un mayor volumen de precipitación horaria que, como consecuencia, lleva a una mayor probabilidad de pérdidas materiales e inmateriales.

WayCarbon (2016) también presenta un análisis de la capacidad de adaptación a las inundaciones en el municipio. Para ello, se tuvieron en cuenta los siguientes elementos: población en zonas con escasa infraestructura (históricamente denominadas "*favelas*"), población de bajos ingresos, existencia de centros de alerta de precipitaciones, presencia de construcciones para reducir el riesgo de inundaciones y embalses para el control de inundaciones. El resultado puede verse en la figura 2.

Figura 2: Capacidad de adaptación a las inundaciones en Belo Horizonte en 2016 y 2030



Fuente: WayCarbon (2016)

En esta modelización también es posible observar que las áreas regionales en las que está presente la cuenca del Ribeirão Arrudas tienen una baja capacidad de adaptación. El escenario para 2030 considera, entre varios otros factores proyectados, la existencia de obras de control de inundaciones previstos para cada subcuenca. Sin

embargo, cabe mencionar que el documento sólo menciona las intervenciones tradicionales de drenaje que pueden generalizarse como "infraestructura gris", sin citar las intenciones del gobierno de la ciudad de adoptar las SbN como medida de adaptación frente al cambio climático. Lo más probable es que esto se deba a que en la época en que se realizó el informe esta práctica no estaba tan difundida como en la actualidad.

A menor escala, existen estudios que realizan simulaciones considerando la implementación de infraestructura verde para dos subcuencas de la cuenca de Ribeirão Arrudas. En Oliveira (2022), el área de estudio es la cuenca del Ribeirão Jatobá, uno de los afluentes del Ribeirão Arrudas, que está localizada, en su mayor parte, en la región del Barreiro. Para la modelización hidrológica se eligieron dos tipos de técnicas que contribuyen para el aumento de la permeabilidad de la cuenca y, en consecuencia, deberían reducir los picos de crecida y las inundaciones: las cubiertas verdes y los pavimentos permeables. Se utilizó el programa ABC-6, que utiliza métodos sintéticos para diseñar caudales máximos para cuencas pequeñas, que no disponen de muchos datos, y se simularon dos escenarios. El escenario 1 sería el escenario de 2022 con uso y ocupación del suelo sin ninguna intervención en cuanto a la implantación de infraestructuras verdes. El escenario 2 contempla la aplicación de las dos técnicas ya mencionadas en las zonas disponibles. Con la ayuda del software, se generaron hidrogramas en la salida de la cuenca, que, por ser afluente del Ribeirão Arrudas, sería precisamente el punto de encuentro de las dos masas de agua, para un tiempo de concentración de 40 minutos y periodos de retorno (PR) de 5, 10 y 50 años. Para las precipitaciones PR de 5 años, se observó una reducción del caudal punta en el escenario 2 con respecto al escenario 1 del 21,4%. Para PR a 10 años, una reducción del 20,3% y para PR a 50 años, una reducción del 17,9%. Con esto, Oliveira (2022) concluyó que para todos los PR la implantación de infraestructura verde ayuda en el control de inundaciones y que, para lluvias de mayor magnitud, o sea, PR mayores la reducción es menor debido a la limitada capacidad de retención de las cuencas ante fuertes precipitaciones, independientemente del porcentaje de áreas impermeables. El estudio no menciona modelos regionales que proyecten escenarios ante el cambio climático, pero como se verá más adelante en este estudio, el cambio climático trae consigo tendencias de aumento de fenómenos meteorológicos extremos, como las lluvias

intensas, es decir, la tendencia es a que disminuyan los TR de precipitaciones de gran magnitud.

En Rosa (2017), se realizó una modelización hidrológica e hidráulica para la cuenca del Córrego do Leitão, también uno de los afluentes del Ribeirão Arrudas, para cuatro escenarios distintos. El primero considerando las características de la cuenca en 2017, el segundo considerando la inexistencia del embalse de retención que existe para el control de inundaciones, el tercero para una situación de máxima impermeabilización del suelo permitida por la legislación – que, en este caso, sería de 81,8% del total - y, por último, un escenario de implantación de infraestructura verde en el 100%, 50% y 10% de la superficie impermeable de la cuenca. El estudio aplicó como infraestructura verde: pavimentos permeables, cubiertas verdes, zanjas de infiltración. Además, se aplicaron embalses individuales y la desconexión de tejados para dirigir la escorrentía a zonas permeables en lugar de a la red de drenaje. La combinación de estas 5 infraestructuras permitió tratar el 69% de las zonas impermeables de la cuenca. La modelización hidrológica se realizó con el programa *Storm Water Management Model (SWMM) 5.1* y la modelización hidráulica con HEC-RAS.

El resultado más impactante en relación al aumento del caudal pico fue el que consideró la no existencia del embalse de retención, ya que se pudo observar un aumento medio del caudal pico del 70% en una avenida cercana y del 10% en el emisario. Para el escenario de impermeabilización máxima, se produjo un aumento medio del 30% del caudal máximo en la desembocadura. Con la implantación de infraestructuras verdes en el 100% de la superficie impermeable, la caudal punta en el desagüe se redujo un 60% de media, para el escenario del 50%, una reducción del 30%, y para el escenario del 10%, una reducción de aproximadamente el 5%. Con la modelización fue posible observar la influencia positiva que el embalse de retención tiene sobre la cuenca en el control de inundaciones, así como el potencial para la implementación de infraestructura verde, debido al aumento de la infiltración y consecuente reducción de la escorrentía superficial. Sin embargo, el estudio señala que, en caso de precipitaciones secuenciales, el efecto de estas estructuras se reduce debido al tiempo necesario para la infiltración y evapotranspiración de los volúmenes de agua almacenados.

Una vez presentadas las principales referencias teóricas correlacionadas, también es pertinente presentar lo que ya ha sido realizado por el ayuntamiento del municipio en relación con el control de inundaciones y el uso de SbN, que muestran cambios de paradigma en la planificación urbana. Según la *Prefeitura de Belo Horizonte* (PBH) (2022b), además de las diversas intervenciones estructurales para reducir el riesgo de inundaciones, con inversiones de cerca de 2.000 millones de reales en los últimos 10 años, el municipio de Belo Horizonte viene adoptando técnicas compensatorias de drenaje, iniciativas más sostenibles destinadas a conseguir hidrogramas de inundación más próximos al nivel natural. En la práctica, en el municipio de Belo Horizonte, el tema de la reintegración de la naturaleza en el trazado urbano se inicia con el *Programa de Recuperação Ambiental de Belo Horizonte*, el DRENURBS. Lanzado por la Secretaría Municipal de Política Urbana del municipio, el programa adoptó una concepción innovadora al ofrecer alternativas a la estrategia tradicional de canalización de los ríos como única solución de drenaje y fue concebido para ser ejecutado por etapas, abarcando un total del 51% del área total del municipio, que abarca 47 subcuencas, y aproximadamente el 45% de la población (SOLUÇÕES PARA CIDADES, 2016). También en consonancia con una estrategia de aplicación descentralizada de medidas paliativas en pequeñas intervenciones en los territorios de las cuencas hidrográficas (PBH, 2022).

Es en este contexto en el que el programa se relaciona con el tema de este estudio. DRENURBS se fundamentó en el tratamiento integrado de los problemas sanitarios y medioambientales a escala de la cuenca hidrográfica. De esta forma, las etapas del proyecto incluyeron la adopción de cunetas vegetadas; la implantación de parques y áreas de preservación permanente a lo largo de los cursos de agua; la implantación de embalses de retención; el tratamiento integrado de los cuerpos de agua como elementos del paisaje urbano; la participación de las comunidades en los procesos decisorios relativos a la recuperación y conservación de los espacios urbanos recuperados; y la promoción de acciones de educación ambiental (SOLUÇÕES PARA CIDADES, 2016). Entre los objetivos del programa figuran la recuperación de 140 kilómetros de cursos de agua, la reducción del riesgo de inundaciones y la integración de los recursos hídricos naturales en el trazado urbano. Cabe destacar también que además de estas medidas estructurantes, que incluyeron la revitalización de cuencas

dentro del municipio de Belo Horizonte, para minimizar los daños materiales e inmateriales, la PBH invirtió en acciones de planificación y monitoreo en las regiones de mayor riesgo a través de la creación de los *Núcleos de Alerta de Chuvas* (NAC). En total, son 40 centros con cerca de 400 participantes que viven en las zonas de riesgo, cuya función es consolidar un sistema de alerta de inundaciones, creando una dinámica de comunicación para difundir avisos de lluvias con riesgo de inundación, vías de escape y localización de puntos de apoyo.

El ayuntamiento también ha adoptado incentivos económicos, mediante descuentos en la “*Outorga Onerosa do Direito de Construir*”¹ (OODC) para la implantación de infraestructuras verdes y azules, más allá de lo que exige la ley, en los nuevos edificios del municipio, a través del *Plano Diretor* de Belo Horizonte, que entró en vigor con la aprobación de la ley municipal nº 11.181/2019. La construcción de redes multifuncionales de fragmentos permeables y vegetados interconectados, que reestructuran el mosaico paisajístico, ayudan a reequilibrar el régimen hidrológico territorial garantizando una mayor absorción de agua, además de contribuir a reducir las islas de calor. Por lo tanto, esta iniciativa pretende mejorar la calidad de vida urbana y los procesos hidrológicos y climáticos del municipio, así como promover espacios multifuncionales y, en consecuencia, el desarrollo inmobiliario (DRUMOND; ALMEIDA; NASCIMENTO, 2023).

Los autores analizaron la aplicabilidad de este incentivo en todo el territorio, calculando su viabilidad financiera mediante la comparación de los posibles descuentos con los costes medios de las técnicas de infraestructura verde y azul. Su conclusión es que sólo las parcelas situadas en zonas con mayor valor de mercado, que representan una minoría del territorio, recibirán realmente un incentivo de acuerdo con el plan director. Los resultados indican que para el sector privado la aplicación de estas estrategias técnicas para mitigar los efectos de la impermeabilización del suelo y del cambio climático, desde una perspectiva económica, no resulta atractiva en las regiones menos valoradas por el mercado inmobiliario, que son precisamente las que suelen sufrir en mayor medida el impacto de las inundaciones. Por lo tanto, corresponde a las

¹ Más detalles sobre el OODC en: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-que-e-outorga-onerosa-do-direito-de-construir-e-como-ela-ajuda-tornar-cidades-mais>

autoridades públicas intervenir directamente en estas zonas o ajustar los parámetros del incentivo para que, de hecho, sea válido para la mayor parte del territorio y sus beneficios puedan percibirse a escala urbana.

En Nascimento *et al.* (2022), se analiza el mismo mecanismo de incentivos económicos urbanos, pero esta vez las simulaciones se combinan con previsiones climáticas para evaluar la eficacia de la atenuación de las inundaciones en la cuenca del Ribeirão Arrudas. Los escenarios simulados combinan dos dimensiones de incertidumbre: la adopción o no de técnicas de infraestructura verde/azul para mitigar y los fenómenos pluviométricos extremos derivados del cambio climático. Se simularon cuatro escenarios para la cuenca del Ribeirão Arrudas. En el primer escenario, denominado S0, la evaluación del riesgo de inundación considera el uso actual del suelo en Belo Horizonte. El S1 evalúa el riesgo de inundación considerando el uso actual del suelo y todos los edificios nuevos de la zona de la ciudad equipados con depósitos de agua de lluvia, que son obligatorios para los edificios nuevos según la legislación sobre el uso del suelo promulgada recientemente. El S2 evalúa el riesgo de inundación considerando el uso actual del suelo, todos los edificios nuevos equipados con depósitos y, cuando el incentivo económico es efectivo, también equipados con jardines de lluvia o cubiertas verdes. Por último, el S3 evalúa lo mismo que el S2, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones.

Los autores llegaron a cuatro resultados principales. El primero es que con el uso actual del suelo y solamente los embalses de detención como técnica de “infraestructura verde/azul” no son suficientes para reducir significativamente el riesgo de inundaciones en el contexto urbano de Belo Horizonte. La segunda es que, considerando un escenario de máxima renovación inmobiliaria, la adopción de estas técnicas puede reducir los caudales punta, que varían del 50% para lluvias con periodo de retorno de 2 años (evento muy frecuente) al 5% para lluvias con periodo de retorno de 100 años (evento poco frecuente). La tercera, en concordancia con Drumond, Almeida y Nascimento (2023), fue que es probable que los mercados inmobiliarios incluyan técnicas de infraestructura verde/azul sólo en áreas de alto valor, debido a la comparación costo-beneficio entre los costos de OODC y la implementación de las

técnicas, considerando las tendencias típicas de renovación del mercado que actuarán principalmente en estas regiones.

Las simulaciones hidrológicas e hidráulicas para eventos frecuentes y menos frecuentes sugieren que la nueva ley del plan director no es suficiente para influir en la decisión sobre el uso de técnicas de infraestructura verde/azul al nivel necesario para minimizar efectivamente el riesgo de inundaciones en la cuenca, sin embargo, pueden desempeñar un papel positivo en inundaciones más frecuentes a escala local, como parte de una carretera o una manzana. Ya las simulaciones climáticas, a pesar de presentar altos niveles de incertidumbre en las simulaciones de largo plazo, exhibieron un patrón de aumento constante del nivel de eventos extremos de lluvia en la última década y pueden significar, en el futuro, un aumento de episodios de inundación. Para Nascimento *et al.* (2022), los resultados simulados llaman la atención para intervenciones públicas más directas, como parques públicos y cubiertas verdes en edificios públicos, una vez que el mercado inmobiliario, en un espacio urbano altamente segregado y desigual como el de Belo Horizonte, ofrece poca esperanza de ecologización en un futuro próximo.

Un ejemplo de intervención pública, con la ayuda de organizaciones internacionales, es el INTERACT-BIO. Según la PBH (2018), el municipio, junto con la institución *International Council for Local Environmental Initiatives* (ICLEI), participó de ese programa que consiste en un proyecto de cuatro años que tiene como objetivo mejorar el uso y la gestión de los recursos naturales en el entorno urbano. Más concretamente, pretende integrar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en la planificación territorial, la gestión del uso del suelo, el desarrollo económico local y los proyectos de infraestructuras. El proyecto duró cuatro años, a partir de 2018, y fue financiado por el Ministerio Federal Alemán de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear, a través de la Iniciativa Internacional de Protección del Clima, y coordinado por ICLEI. Según ICLEI (2022), ese mismo año se inauguraron jardines de lluvia en el *Parque Lagoa do Nado*, situado en la cuenca del Ribeirão do Onça, en Belo Horizonte, para ayudar al drenaje local y reducir el riesgo de inundaciones. Según la organización, la elección del lugar tuvo en cuenta la gran circulación de personas, dando más visibilidad al proyecto y el hecho de que, durante la

época de lluvias, es uno de los lugares de la ciudad que más sufre las inundaciones. El proyecto funcionará como piloto, sirviendo de ejemplo para la implantación de SbN en otras zonas de la ciudad que también tengan el mismo problema. Además de maximizar la infiltración, los jardines de lluvia, también llamados sistemas de biorretención, utilizan la actividad biológica de las plantas para filtrar los contaminantes del agua de lluvia.

1.3. Estructura del trabajo

Para una mejor organización, este trabajo se divide en 7 capítulos, incluido el presente capítulo *Ruptura metabólica entre territorio y metrópolis (cap. 1)*, en el que se expusieron las motivaciones personales que llevaron a realizar este estudio, los principales antecedentes teóricos y prácticos correlacionados con este estudio para la misma región, la relevancia de la investigación ante la realidad de la desvinculación del medio natural y la ciudad, y la contextualización del territorio según su historia de ocupación. Además, se presentan los objetivos generales y específicos, así como el marco metodológico de la investigación junto con su respectiva descripción.

En el cap. 2 – *Aproximación al cambio climático como fenómeno físico: escenarios previstos* - se inicia la contextualización del marco teórico de la investigación. Esa etapa empieza recopilando referencias científicas relativas a su origen, seguido por ejemplos de lo que el mundo está viviendo en la actualidad, es decir, los cambios ya perceptibles y los distintos escenarios posibles basados en el contexto político y socioeconómico actual. Adoptando ese contexto más general, se presentan también los diversos eventos climáticos extremos existentes y que pueden agravarse a corto o medio plazo, profundizando en los relativos al régimen de lluvias por su fuerte correlación con el drenaje de los medios urbanos.

Dando continuidad a la etapa del estado de la cuestión teórica, el cap. 3 - *Construcción de ciudades más resilientes ante las inundaciones* - profundiza en los conceptos de resiliencia y adaptación urbanas como medio de llevar esta característica al territorio. También analiza el papel de las SbN como herramientas de adaptación frente a las crecidas/inundaciones y el cambio climático. Para ellos se aportan algunos ejemplos de los principales tipos de soluciones que pueden emplearse y casos de SbN ya implementado en el mundo.

En el cap. 4 - *Caracterización geofísica de la cuenca del Ribeirão Arrudas frente a las inundaciones* - se efectúa la caracterización de los principales factores climáticos y geofísicos de la cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas que poseen algún tipo de correlación con los dos temas principales desarrollados, el cambio climático y el drenaje. Estas temáticas son principalmente: clima, geología, geomorfología y uso y ocupación del suelo.

A continuación, en el cap. 5 – *El futuro mediante premisas del cambio climático y adaptación con el uso de SbN* - se muestran los detalles del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico TETIS para la cuenca del Ribeirão Arrudas. Para ello, se han definido los parámetros y resultados conforme a los tres escenarios simulados: periodo de referencia (1); cambio climático según los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5 (2); y cambio climático para los mismos escenarios, pero considerando la implantación de cubiertas verdes y jardines de lluvia como SbN (3).

En el cap. 6 – *Discusión de los resultados* - se plantea el análisis comparativo de los tres escenarios simulados y, con eso, se ha desarrollado una discusión acerca de los resultados de reducción de caudales máximos para crecidas de diferentes periodos de retorno (PR).

En el cap. 7 – *Conclusiones* - se vuelve a la hipótesis inicial, los resultados y se presentan recomendaciones coherentes con los datos obtenidos considerando el contexto local actual.

Finalmente, en el Anexo se presenta una descripción detallada de la construcción de los mapas de parámetros utilizados en el modelo hidrológico TETIS, así como los criterios utilizados para la calibración automática y validación del modelo.

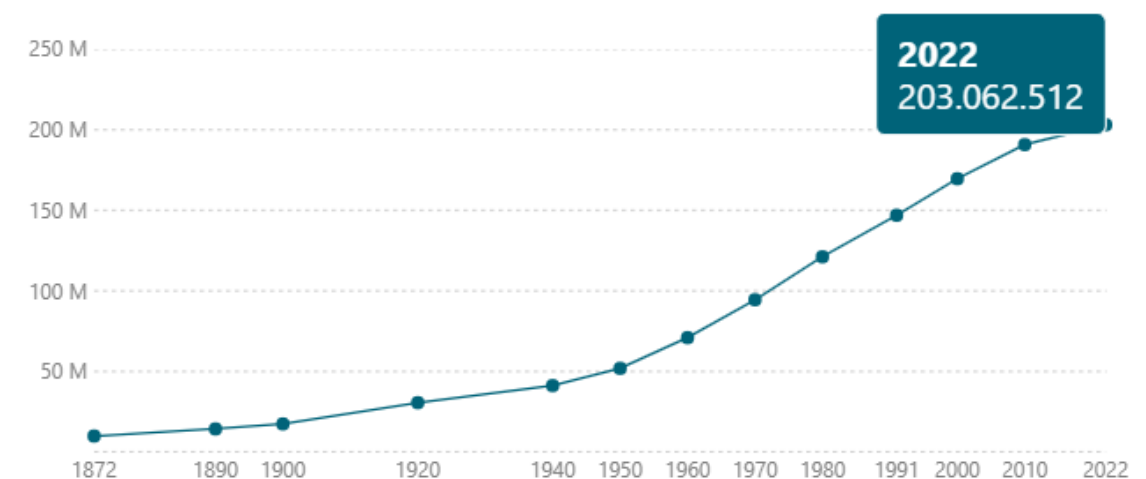
1.4. Relevancia de la investigación

1.4.1. El proceso de urbanización y sus externalidades

El proceso de urbanización en Brasil, y en todo el mundo, ha provocado cambios significativos en el uso y la ocupación del suelo. A lo largo del siglo XX, la población brasileña pasó de ser básicamente rural, durante las primeras décadas, a ser mayoritariamente urbana, a finales de siglo. Según el *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE), en el censo de 2010, la tasa de urbanización de Brasil era del 84,36%,

en ese mismo año, y 92,95% en la región sureste, dónde el territorio de este estudio está ubicado (IBGE, 2010). En 2022, la población del país alcanzó los 203,1 millones de habitantes con una tasa de crecimiento en comparación con el censo anterior, de 2010, de 0,52%, la más baja desde el primer censo de 1872 (GRÁ. 1).

Gráfico 1: Evolución de la población brasileña 1872-2022



Fuente: IBGE (2022)

Sin embargo, cabe destacar que cerca de 75% de ese crecimiento demográfico, 9,2 millones de personas, se produjo en las llamadas concentraciones urbanas. Este término se refiere a los agrupamientos de población con más de 100.000 habitantes de un grupo de municipios conectados físicamente, que funcionan como uno solo, o de municipios aislados. En 2022, alrededor del 61% de la población vivía en este tipo de concentraciones, unos 124 millones de habitantes (AGÊNCIA IBGE, 2023). Estos datos son relevantes en un escenario de macro análisis ya que los grandes centros urbanos, debido a su elevada concentración demográfica y las fuertes alteraciones del entorno natural, se vuelven más vulnerables en muchos sentidos, como se describirá más adelante en este estudio.

Según Salazar-Galán, Mascort-Albea y Sánchez-Fuentes (2022), el rápido crecimiento demográfico, como el caso brasileño, provocan una gran alteración del paisaje natural, principalmente debido a la impermeabilización del suelo, la construcción en masa de infraestructuras y la expansión de las zonas cultivadas. Cambios que tienen un fuerte impacto en las cuencas hidrográficas y sus masas de agua. Entre los aspectos negativos de la urbanización sobre la cuenca están: las alteraciones

del ciclo hidrológico; la contaminación de los medios acuáticos debido al vertido de aguas residuales domésticas o a la falta de sistemas de recogida de aguas residuales; los residuos sólidos desechados incorrectamente; y el vertido de efluentes no tratados en el suelo, que contribuyen a la contaminación de las masas de agua subterráneas (MOTA, 2008 *apud* JÚNIOR; SANTOS, 2013). Impactos fácilmente identificables en la cuenca del Ribeirão Arrudas.

Las ciudades permiten escalar economías, pues prestan servicios a un gran número de personas, impulsan el crecimiento económico y la innovación y crean empleo. Pero las ciudades también están a la vanguardia tanto de las causas como de los impactos de los principales retos medioambientales actuales, como el cambio climático, la contaminación y la pérdida de biodiversidad (UNEP, 2021). La fuerte presión humana sobre el medio natural no sólo causa la sobrecarga y la pérdida de ecosistemas, sino que también trae consigo una serie de nuevos riesgos para el futuro de la humanidad como resultado de una visión de la disociación territorial (SÁNCHEZ-FUENTES; MASCORT-ALBEA; SALAZAR-GALÁN, 2023). Para los autores, vivimos una crisis socioecológica global, muy relacionada con los entornos urbanos, que demanda un cambio de paradigma en la planificación territorial, especialmente en las metrópolis. En un contexto en el que se ha perdido la noción de territorio, hay que romper la dualidad históricamente construida entre el medio natural y la metrópoli, frenando la disociación entre la naturaleza y la ciudad y restableciendo el equilibrio metabólico entre los dos elementos.

En Barrera y Olmo (2008), los autores refuerzan y complementan esa misma línea de pensamiento. Para garantizar la sostenibilidad del medio natural es necesario lograr una relación armónica, equilibrada y equitativa entre el mantenimiento de la funcionalidad de los sistemas naturales y la explotación racional de los múltiples beneficios que generan, es decir, los efectos de la acción antropogénica sobre el medio ambiente. La sostenibilidad no puede abordarse desde un punto de vista sectorial; o es integral o no hay capacidad para garantizarla. En otras palabras, es necesario diagnosticar, planificar y actuar en términos de ecosistemas, y no sólo en términos de entidades espaciales con límites administrativos, como estados, municipios, áreas protegidas, etc. Puesto que los principales factores y procesos que determinan el

mantenimiento de los ecosistemas se expresan en magnitudes que normalmente no coinciden con los límites administrativos.

Junto a los conceptos de sostenibilidad territorial viene también el de integridad del territorio. Según Barrera y Olmo (2008), el nivel de integridad representa una cierta capacidad de respuesta ante cualquier tipo de perturbación, independientemente de su origen y, por tanto, sirve para medir la resiliencia de los ecosistemas. Esto significa que un ecosistema con integridad tiene sus propios componentes y procesos que son necesarios para mantener permanentemente su marco ecológico de referencia y, por lo tanto, dentro de cualquier plan de análisis y gestión territorial, se requiere un enfoque holístico que permita mantener estos elementos para garantizar la conservación de su integridad ecológica. De todas maneras, en términos generales, se sabe que cuanto mayor es la influencia antropogénica sobre un ecosistema, menor es el nivel de integridad ecológica en su estructura y funcionamiento, y es esta cuestión la que pretende abordar este estudio: cómo adaptar una zona ya muy antropizada para que recupere algunas de sus funciones ecosistémicas esenciales. La cuestión es que los habitantes de los centros urbanos a menudo no comprenden que el trazado urbano también forma parte de un ecosistema más amplio. De este modo, la resiliencia aplicada a la ordenación y gestión del territorio debe tenerse en cuenta en todas las escalas posibles de diagnóstico y actuación (SÁNCHEZ-FUENTES; MASCORT-ALBEA; SALAZAR-GALÁN, 2023).

1.4.2. Impacto del cambio climático sobre la disociación metabólica territorial

La visión histórica de disociación entre el medio natural y la ciudad tampoco se sostiene cuando se trata del cambio climático. En la práctica, los efectos del cambio climático que, en este contexto pueden considerarse como perturbaciones sobre el medio, no se limitan a las fronteras administrativas. El desequilibrio metabólico ya presente en los territorios no hace sino agravar sus consecuencias, es decir, sus impactos presentes y futuros actúan de forma global sobre el territorio, independientemente de que exista o no una aglomeración urbana. Y cuando la hay, los riesgos suelen ser mayores y, muchas veces, proporcionales a los índices de densidad poblacional y a la antropización del territorio.

El sistema climático mundial es un sistema complejo de escala global y, por eso, su comprensión debe ser en una visión holística, tanto en la teoría como en las mediciones empíricas. Mediciones que incluyen las principales fuerzas y factores que rigen su transporte de energía y masa por todo el planeta; las propiedades químicas y físicas de la atmósfera, el océano, la criosfera y las superficies terrestres; y la dinámica biológica y física de los ecosistemas naturales, así como las numerosas retroalimentaciones entre estos procesos. También abarca la comprensión de cómo las actividades humanas pueden afectar al clima, junto con técnicas que permitan separar la "señal" del cambio climático antropogénico del "ruido" de la variabilidad natural del clima, según el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021).

Además de cómo las actividades humanas afectan al clima, hoy en día también es necesario entender cómo el cambio climático afecta las actividades humanas. Para Musseta (2020), el clima influye en los procesos sociales a través de una serie de estímulos y tensiones que van desde fenómenos meteorológicos extremos hasta cambios más sutiles, pero no menos poderosos, de la temperatura y las precipitaciones. Debido a la complejidad de los tejidos urbanos, estas regiones se vuelven aún más vulnerables a las catástrofes globales asociadas a fenómenos climáticos y ecológicos (SÁNCHEZ-FUENTES; MASCORT-ALBEA; SALAZAR-GALÁN, 2023).

Como consecuencia de esta expansión urbana acelerada y de la falta de planificación territorial, están apareciendo riesgos asociados a fenómenos naturales. Según el *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) y el *UN Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) en CRED y UNDRR (2020), los factores de riesgo y sus consecuencias se han multiplicado en cascada, agrupándose de forma imprevista. Aunque la mejora de los registros y los informes puede explicar parcialmente parte del aumento de los eventos, gran parte se debe a un incremento significativo del número de catástrofes en torno a fenómenos climáticos. Entre 2000 y 2019, se produjeron 510.837 muertes y 3.900 millones de personas se vieron afectadas por 6.681 desastres relacionados con el clima. Esto es una clara evidencia de que, en un mundo donde la temperatura media global en 2019 fue 1,1 °C por encima del período preindustrial, los impactos se están sintiendo en el aumento de la frecuencia de fenómenos

meteorológicos extremos, como olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas, huracanes e incendios forestales.

En todo el mundo, las inundaciones, objeto de este estudio, son el tipo de desastre más común, representando el 44% del total de eventos considerados, cerca de 3.254 episodios entre 2000 y 2019, que afectaron 1.600 millones de personas en todo el mundo. La impermeabilización es en gran parte responsable de ello. Según Hollis (1975), estudios han demostrado que la urbanización puede multiplicar hasta por 10 las pequeñas inundaciones y que las inundaciones provocadas por precipitaciones con un periodo de retorno de 100 años pueden duplicar su tamaño cuando se impermeabiliza el 30% de la cuenca.

Los impactos se estiman también a escala regional. El *World Resources Institute* (WRI) estima que 270.000 personas son impactadas anualmente por inundaciones en Brasil, y para 2030, 62.000 personas al año se verán afectadas por eventos de inundación solo en el estado de Minas Gerais, estado en el que se encuentra el área de estudio; en el mismo escenario, los daños financieros se estiman en alrededor de 880 millones de dólares en todo el estado (WRI, 2015; WRI, 2015 *apud* SILVA *et al.* 2023). Además, Waycarbon (2016) indica un aumento del 32% (variación relativa) en el riesgo de daños asociados a lluvias intensas - como deslizamientos de tierra - para Belo Horizonte en 2030 en comparación con el 2014.

Muchos de estos impactos pueden evitarse porque las inundaciones, a diferencia de la mayoría de los tipos de catástrofes, cuentan con mecanismos de prevención accesibles, tanto las típicas infraestructuras grises de drenaje como los de infraestructuras verdes. Y aquí es donde las SbN se correlacionan con lo que ya se ha dicho, al ser capaces de influir positivamente en la resiliencia del territorio cuando se utilizan bien, haciéndolo más adaptable a los riesgos existentes. Sin embargo, como señala Mussetta (2020), cuando se trata de adaptar el territorio debemos ir más allá de la noción predominante de adaptación al cambio climático, es decir, que las soluciones son solamente tecnológicas.

Para Sánchez-Fuentes; Mascort-Albea; Salazar-Galán (2023), nos encontramos ante un escenario preocupante debido a la amenaza inminente sobre muchas de las

metrópolis que antes eran consideradas como espacios seguros y poco vulnerables. Por tanto, se defiende un cambio de paradigma en la ordenación del territorio fundamentado en estrategias resilientes basadas en el bienestar social, la justicia medioambiental y el equilibrio metabólico. En este contexto, la adaptación, sugerida en este estudio mediante la aplicación de las SbN, surge como un proceso de ajuste, de reconciliación entre dos sistemas altamente relacionados que históricamente se han distanciado y han perdido la sincronía.

Por lo tanto, en este estudio se plantea mostrar cómo la disociación entre el medio natural y la ciudad, con la falta de una planificación territorial integrada, se traduce en riesgos para la población urbana y cómo esto se potencializa ante un escenario de cambio climático. A continuación, se presenta una contextualización del territorio objeto de este estudio, la cuenca del Ribeirão Arrudas.

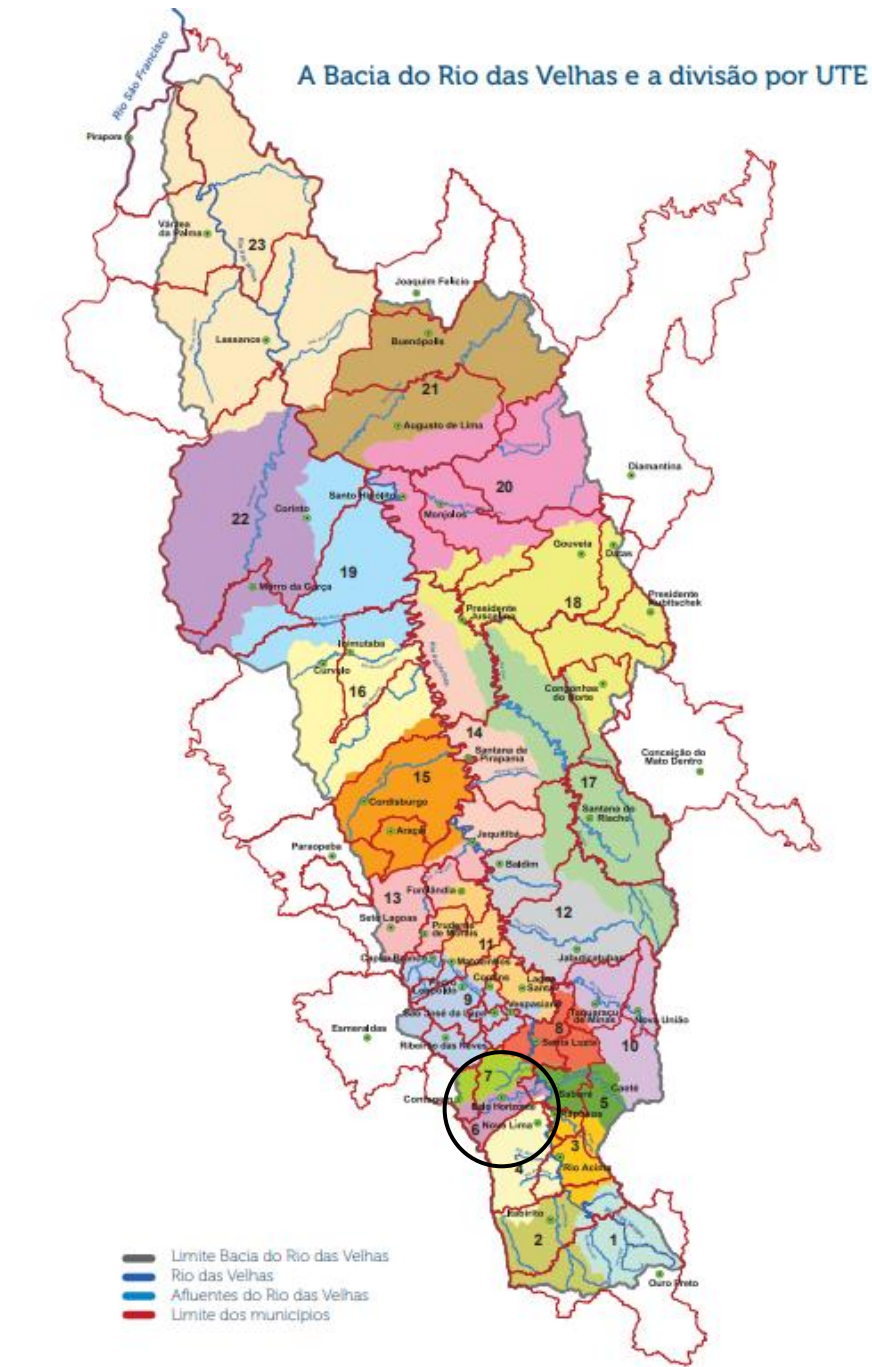
1.5. Problemática del caso de estudio: inundaciones en la cuenca Arrudas

1.5.1. Contexto General

En 1997 se creó la Ley nº 9.433, conocida como *Lei de Águas*, que instituye la *Política Nacional de Recursos Hídricos* y crea el *Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos*. Entre otros beneficios de la ley está la definición de las cuencas hidrográficas como unidades de planificación para la gestión del agua. Es decir, con la formación de los Comités de Cuencas Hidrográficas, la gestión pasa a ser descentralizada, siendo conducida por los municipios y por la sociedad civil organizada, además de otras instancias del gobierno estadual y federal (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019). En este contexto, en 1998 se constituyó el *Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas* (CBH Velhas), que se sitúa en la región central del estado de Minas Gerais y está dividido en 23 *Unidades Territoriais Estratégicas* (UTE's), una de las cuales es la cuenca del Ribeirão Arrudas (CBH VELHAS, 2016).

La figura 3 muestra la distribución de las UTE's en el territorio, junto con una lista de sus respectivos nombres, en la que la UTE objeto de este estudio se identifica con el número 6.

Figura 3: Cuenca del Rio das Velhas y sus respectivas UTE's



Fuente: Adaptado de CBH Velhas (2016)

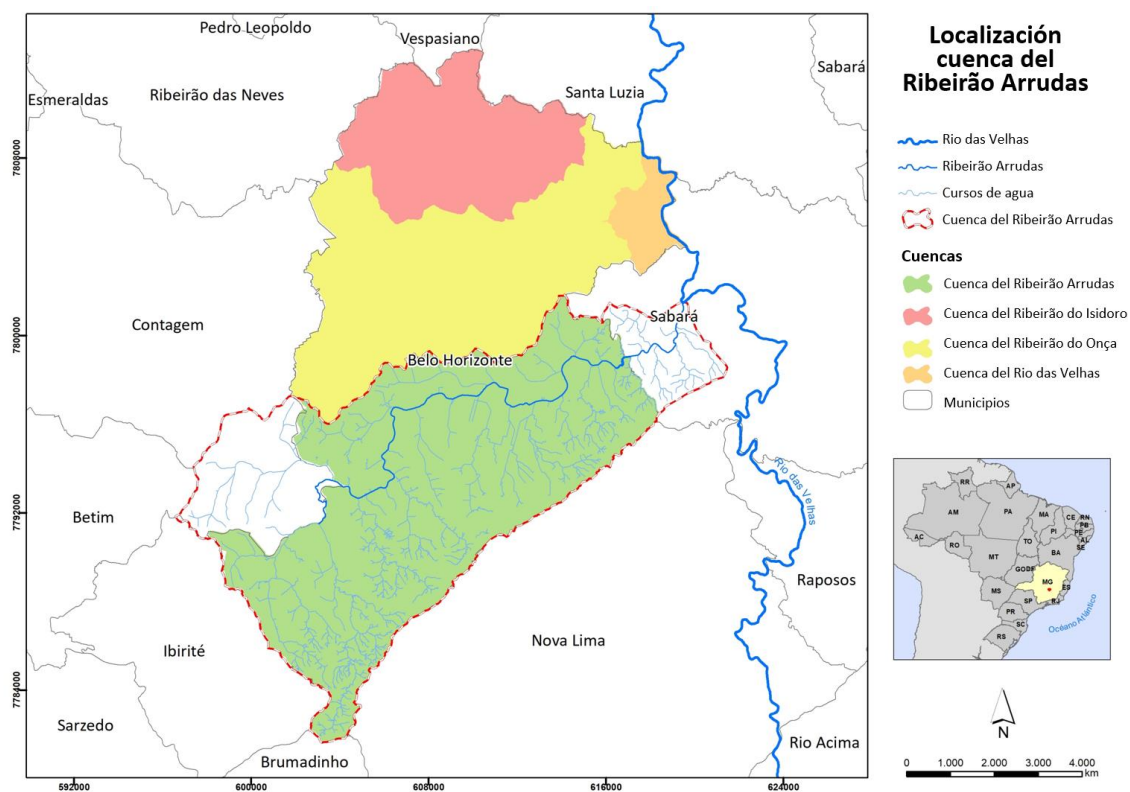
La cuenca del Ribeirão Arrudas abarca los municipios de Contagem, Belo Horizonte y Sabará. Según Borsagli (2016), la cabecera del Ribeirão se localiza en las vertientes de la *Serra do Rola Moça*, en la región del Barreiro, y se forma a partir de la confluencia de los Córregos do Jatobá y do Barreiro.

El Ribeirão Arrudas representa el principal eje hidrográfico de Belo Horizonte, con 43,41 km de longitud, caudal medio de largo período de 5,9 m³/s y caudal mínimo, Q_{7,10}², equivalente a 1,57 m³/s (CBH VELHAS, 2016). Sus principales afluentes en la margen derecha son los arroyos Bonsucesso, Cercadinho, Piteiras, Pintos, Leitão, Acaba Mundo, Serra, Cardoso, Navio, Taquaril, Freitas, Olaria y Cafundó. Ya en la margen izquierda, los principales afluentes son los arroyos Ferrugem, Tejuco, Pastinho, Lagoinha, Mata, Horto e Britos (BORSAGLI, 2016).

En la figura 4, es posible observar la delimitación de la Cuenca Hidrográfica del Ribeirão Arrudas, junto con su red hidrográfica, su localización en Belo Horizonte y en la *Região Metropolitana de Belo Horizonte* (RMBH), además de las otras tres cuencas presentes en Belo Horizonte.

² Q_{7,10} es el caudal mínimo de 7 días consecutivos con un período de recurrencia de 10 años. Este valor se adopta como referencia para la concesión de licencias y también para definir la situación de las aguas en el estado de Minas Gerais (IGAM, 2015).

Figura 4: Localización de la cuenca del Ribeirão Arrudas en la RMBH



Fuente: Autoría propia

Igualmente, de acuerdo con CBH Velhas (2016), la UTE tiene una superficie de 228,37 km² y su población es de aproximadamente 1,2 millones de habitantes, de los cuales 1.244.620 habitantes forman parte de la población urbana y 388 habitantes forman parte de la población considerada rural, lo cual muestra el nivel de urbanización de su territorio. La UTE del Ribeirão Arrudas, con una densidad demográfica de aproximadamente 5.255 habitantes/km², es la segunda región con mayor densidad demográfica de la Cuenca Hidrográfica del Rio das Velhas, seguida únicamente por la UTE del Ribeirão do Onça, también ubicada en el municipio de Belo Horizonte (CBH VELHAS, 2016).

1.5.2. Histórico de ocupación y transformación del territorio

Para entender cómo se produjo el desequilibrio metabólico sobre el territorio en cuestión, es importante comprender el proceso de ocupación y transformación territorial provocado por el proceso de urbanización de la ciudad de Belo Horizonte sobre la cuenca. El Ribeirão Arrudas es protagonista en la historia de la urbanización del municipio. Según Borsagli y Bernardes (2015), históricamente el río pasó de ser un

elemento integrador e inductor de la ocupación urbana a un obstáculo en el desarrollo de la ciudad.

Como ocurre en otras regiones, la existencia de agua es casi un factor condicionante para el surgimiento de aglomeraciones urbanas debido a la necesidad de su uso para el abastecimiento humano, la generación de energía, o incluso, la eliminación de aguas residuales. Estos fueron factores considerados a la hora de elegir la ubicación de la nueva capital de Minas Gerais, región que anteriormente albergaba el *Arraial do Curral del Rey* (BORSAGLI; BERNARDES, 2015).

Belo Horizonte fue la primera capital de Brasil que se diseñó y planificó teniendo en cuenta un dictamen técnico. Según Borsagli y Bernardes (2015), el plan oficial de la nueva capital fue presentado en 1895 por la *Comissão Construtora da Nova Capital* (CCNC) y fue desarrollado para albergar el área planificada de Belo Horizonte dentro de los límites de la actual *Avenida do Contorno*. Sin embargo, además de no tener en cuenta las condiciones topográficas locales, en la definición de su trazado ortogonal también ignoró la existencia y los recorridos de los cursos de agua de la región. Lo que muestra la visión distanciada de la época entre la ciudad y el entorno natural.

El único curso de agua que tenía parte de su cauce inicialmente preservado en el proyecto presentado era justamente el Ribeirão Arrudas, en la zona correspondiente al *Parque Municipal Renné Giannetti*, ya que el objetivo era integrarlo en el proyecto de parque urbano. Además, el Ribeirão era un divisor natural de las regiones urbanas y suburbanas, dividiendo las regiones norte y sur del municipio. Otros cursos de agua que atravesaban la antigua villa, como los arroyos Acaba Mundo, Leitão y Serra, tenían desde el inicio de la planificación urbana sus recorridos superpuestos por la apertura de carreteras y la implantación de subdivisiones (BORSAGLI; BERNARDES, 2015). La noción de territorio, en términos de drenaje, ya se había perdido en ese momento.

Además de su papel como línea divisoria natural y elemento paisajístico del Parque Municipal, el Ribeirão Arrudas, según Aguiar (2006), también participó en la infraestructura urbana inicialmente prevista para la nueva capital por la CCNC. Una cascada en su curso, aguas abajo del trazado del proyecto, ayudaría a generar electricidad que se utilizaría para el transporte, previsto con tranvías, y para el

alumbrado público. El proyecto preveía también la instalación de tuberías que formarían una red completa de abastecimiento de agua potable y otra para la recogida de los efluentes generados, que se destinarían a una Estación de Tratamiento de Aguas Residuales.

En 1887, año de la inauguración de Belo Horizonte, el Ribeirão Arrudas sólo había sufrido pequeñas intervenciones en su cauce original. Las alteraciones fueron hechas para la construcción de puentes, necesarios para la conexión con el área suburbana, y para recibir la Estación Ferroviaria, cuyas vías fueron tendidas a lo largo de las márgenes del riacho para facilitar el transporte de los materiales necesarios para continuar la construcción de la nueva capital (BORSAGLI; BERNARDES, 2015).

Con el paso de los años y el aumento de la densidad de población, fue necesaria cierta remodelación espacial para absorber los cambios. Así, continuó el movimiento de rectificación y canalización de los cursos de agua que atraviesan el área urbana. Según Borsagli y Bernardes (2015), parte de las canalizaciones, irradiadas desde el Ribeirão Arrudas, ocurrieron en la década de 1920, más precisamente entre los años 1925 y 1930. Ya en la década de 1930, el escenario político sufrió cambios que impactaron directamente en los planes urbanísticos, sociales y económicos del municipio, que consolidó su expansión urbana a través del incentivo público y desencadenó nuevos cambios espaciales.

Según Borsagli (2016), hasta la década de 1950, existía una convivencia relativamente armoniosa entre la población de Belo Horizonte y sus cursos de agua, ya que aún eran considerados un elemento esencial para el embellecimiento de la ciudad, aunque ya estuvieran parcialmente canalizados a cielo abierto. Sin embargo, con el intenso desarrollo de la trama urbana, los elementos fluviales naturales pasaron a ser vistos como un obstáculo para la expansión del municipio y para la adecuación de las vías de la ciudad, ya que el trazado ortogonal planificado no permitía muchas adaptaciones. Además, en la misma década, las aguas del arroyo estaban prácticamente sin vida debido al constante vertida de aguas residuales domésticas e industriales, siendo estas últimas decisivas para la muerte del arroyo, cuyo hito fue la consolidación de la ciudad industrial, en Contagem. En este contexto de expansión urbana y crecimiento de la contaminación, la población y los organismos públicos comenzaron a

rechazar la idea de integrar los sistemas fluviales en el paisaje urbano, favoreciendo el movimiento pro-canalización (BORSAGLI, 2016).

La figura 5 muestra una de las partes canalizadas de Ribeirão Arrudas a principios de la década de 1960. Según Borsagli (2016), en esa década, la capital comenzó a mostrar señales de las ineficiencias de la planificación que tuvo lugar durante el proceso de desarrollo urbano de la capital. El escenario era caótico en todos los servicios urbanos, especialmente en lo que se refiere a los servicios de drenaje urbano, limpieza pública y aguas residuales, que en su mayoría eran conducidos fuera de la ciudad a través de los ríos. Además, no había árboles en la mayoría de las carreteras y el calor se hacía incómodo en las regiones donde comenzaba a desarrollarse el proceso de verticalización y donde reinaba el asfalto. Fue en esta época que, por primera vez, un alcalde de Belo Horizonte, en la época Amintas de Barros, definió la ciudad como una metrópolis (BORSAGLI, 2016). Irónicamente o no, esta clasificación llega justo cuando la ciudad muestra síntomas cada vez más intensos de desequilibrio metabólico a nivel territorial.

Figura 5: Ribeirão Arrudas en la región de Lagoinha a principios de los años 60



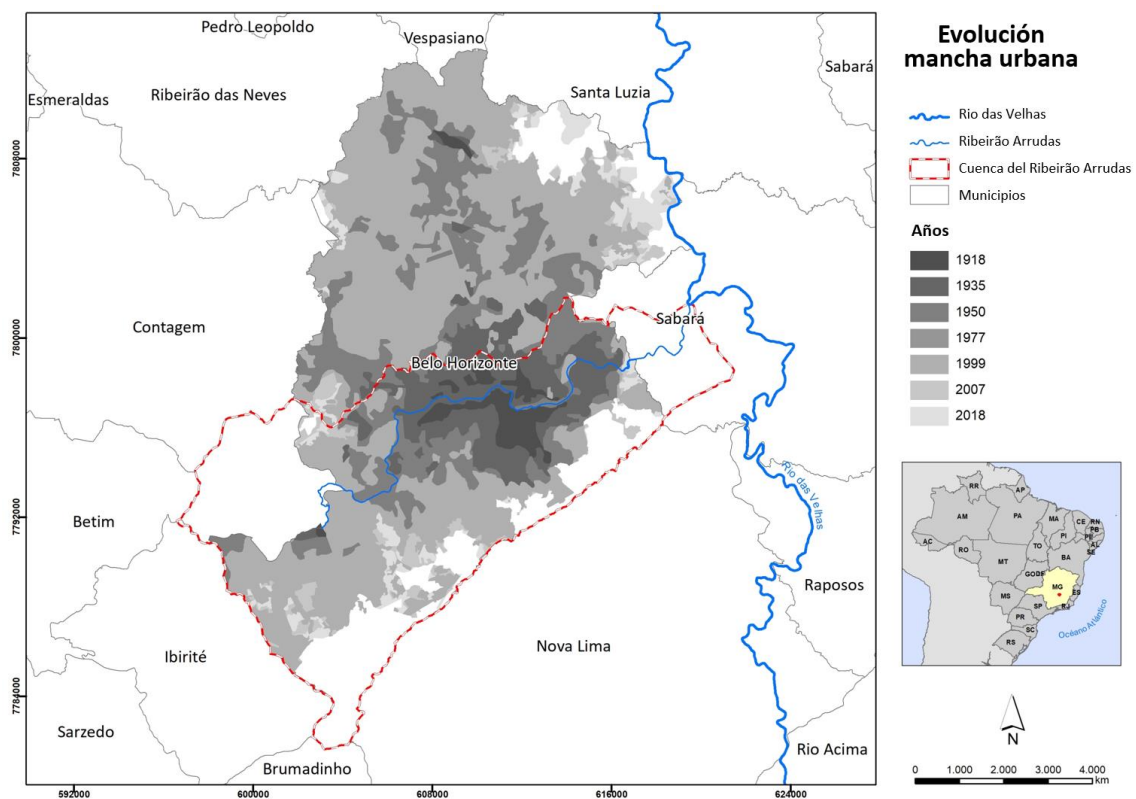
Fuente: APCBH/ASCOM apud Curral del Rey Blogspot (2023a)

Con el aumento de la contaminación, del encenagamiento y de la excesiva cantidad de residuos en el Ribeirão Arrudas, asociados a su bajo caudal y al creciente volumen de aguas residuales vertidas en su lecho, las inundaciones se hicieron recurrentes a partir del final de la década de 1960 y provocaron que la población y el

poder público se preocuparan cada vez más con el terrible estado del arroyo. Los desbordamientos que comenzaron a ocurrir provocaron depósitos de lodo y residuos en las zonas bajas de la región central, lo que generó pérdidas para el comercio y elevó el riesgo de contaminación de la población por enfermedades transmitidas por el agua (BORSAGLI, 2016).

Junto con la evolución de la urbanización del municipio a lo largo del siglo XX, que puede verse en la figura 6, la relación entre los elementos naturales y la capital de Minas Gerais se fue deteriorando, cuando el capital inmobiliario, la comercialización de lotes y la recaudación de impuestos primaron sobre la calidad de vida de la población y la relación entre ésta y los elementos referenciales del paisaje urbano (BORSAGLI, 2016).

Figura 6: Representación temporal de la ocupación de la ciudad de Belo Horizonte



Fuente: Macedo e Umbelino (2009)

En este contexto, las intervenciones continuaron siendo realizadas a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, todavía con el pensamiento de que las canalizaciones de sección rectangular revestidas de hormigón armado eran la mejor solución para el saneamiento y drenaje local. Además, según Borsagli (2016), solo en 2001 se concluyó

la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales del Arrudas, cien años después de la planificación inicial del CCNC.

Como una forma de intentar recuperar el equilibrio tras los fuertes cambios históricos, un año después, en 2002, se lanzó el ya mencionado programa DRENURBS, destinado a promover la reinserción o integración de los cursos de agua en el paisaje urbano, además de posibilitar la descontaminación, controlar la sedimentación y reducir el riesgo de inundaciones. Sin embargo, estas acciones del programa abarcaban sólo los cursos de agua que aún se encontraban en cauce natural, dejando fuera los ríos urbanos canalizados a cielo abierto o cubiertos. Aun así, según el autor, aunque el programa propusiera una mirada innovadora sobre los sistemas fluviales urbanos, no fue suficiente para evitar que, tres años después de su lanzamiento, una nueva parte del *ribeirão* quedara cubierta, debido a la necesidad de ampliar las carreteras dentro del proyecto denominado *Linha Verde*. El proyecto recibió el nombre de *Boulevard Arrudas*, y su alcance se amplió en los años siguientes. Parte de la intervención de este proyecto puede verse en la figura 7.

Figura 7: Ribeirão Arrudas en la Avenida Thereza Cristina tras el proyecto Boulevard Arrudas



Fuente: Curral del Rey Blogspot (2023b)

Una de las principales consecuencias de tales transformaciones a nivel territorial son las inundaciones que, como ya se ha dicho, en Belo Horizonte, se hicieron frecuentes en la década de 1960. Según Rebouças *et al.* (2006), las inundaciones urbanas son el resultado de dos factores que pueden actuar conjunta o separadamente: inundaciones debidas a la urbanización y/o inundaciones en áreas ribereñas. Según el autor, en el primer caso, las inundaciones ocurren debido al mal dimensionamiento de la red de drenaje y a la instalación de puentes, terraplenes, entre otros, que obstruyen la

escorrentía y hacen que las inundaciones se intensifiquen en determinados lugares. En el segundo caso, las inundaciones ocurren de forma natural y periódica, cuando un río ocupa las áreas adyacentes que representan su lecho mayor, debido al aumento del caudal, y alcanza las estructuras y las personas que viven en estas áreas. Así, para tratar de evitar su ocupación, estas zonas que ya son naturalmente susceptibles de inundación deben recibir una atención especial por parte de los poderes públicos y de los profesionales del urbanismo.

1.5.3. Inundaciones y contexto actual de los cambios en la red de drenaje

En ambos casos, la falta de una planificación urbana adecuada e integrada con la red hidrográfica local actúa de forma que agrava las inundaciones urbanas. Con el aumento del caudal punta en las crecidas, las aguas alcanzan más rápidamente el macrodrenaje y son transferidas, también a mayor velocidad, aguas abajo, lo que afecta también al caudal base, al tiempo de ocurrencia del pico de inundación y a una reducción del tiempo de concentración del agua (CAVALCANTE, 2011).

Cavalcante (2011) analizó las inundaciones en la cuenca del Ribeirão Arrudas entre 1930 y 2005, pudiendo distinguir dos patrones de comportamiento. En el primero, durante el inicio de la ocupación urbana de Belo Horizonte, los problemas de drenaje fueron consecuencia de un mal dimensionamiento. Con la expansión urbana, sin embargo, las inundaciones comenzaron a ocurrir principalmente debido a los cambios en el uso y ocupación del suelo, incluyendo la canalización de los cursos de agua de la cuenca. Especialmente, las inundaciones coinciden con los fondos de valle de la cuenca y zonas de menor altitud (CAVALCANTE, 2011). Cabe mencionar también un episodio reciente de gran magnitud en la historia de las inundaciones en la cuenca que demostró el comportamiento catastrófico del actual sistema de drenaje ante eventos extremos. En enero de 2020, dos de las regionales pertenecientes a la cuenca del Arrudas (Barreiro y Oeste) registraron un tercio de las precipitaciones previstas para todo el mes de enero en tan sólo 2 horas y 20 minutos. Además de las intensas inundaciones que se extendieron por todo el tejido urbano, también se produjeron deslizamientos de tierra y varias llamadas de la población que vieron sus casas invadidas por el agua o quedaron varadas (G1 MINAS, 2020a). La figura 8 (a y b) a continuación muestra el nivel del río

Arrudas durante este episodio, que, según la *Proteção Civil Municipal*, subió 9,8 metros debido a las fuertes lluvias (ESTADO DE MINAS, 2020a).

Figura 8: Canal del Arrudas (a) y avenida adyacente (b) en el episodio de lluvias extremas del 19/01/2020



Fonte: Rodrigues apud Estado de Minas (2020a)

En la figura 9 se puede ver la falta de diferenciación entre el canal y la avenida, una de las principales de Belo Horizonte, debido a ineficiencia del sistema de drenaje, a la falta de consideración por las llanuras de inundación naturales del río debido a la ocupación urbana y evento extremo de precipitación.

Figura 9: Vista aérea del canal Ribeirão Arrudas y de la Avenida Tereza Cristina durante el episodio de lluvias extremas del 19/01/2020



Fuente: Rocha apud Estado de Minas (2020)

En el mismo mes, un nuevo episodio ocurrió a nivel estatal, causando 55 muertes en todo el estado de Minas Gerais en sólo una semana. Estos eventos provocaron que 101 ciudades fueran declaradas en estado de emergencia y 5 en estado de calamidad pública (G1 MINAS, 2020b). Ese mes fue el más lluvioso en la historia de Belo Horizonte desde que comenzaron las mediciones climatológicas en 1910, correspondiendo a 932,2 mm, casi tanto como lo que llovió en todo 2019 (ESTADO DE MINAS, 2020b). Los

impactos también persistieron en la infraestructura urbana, como puede verse en la figura 10.

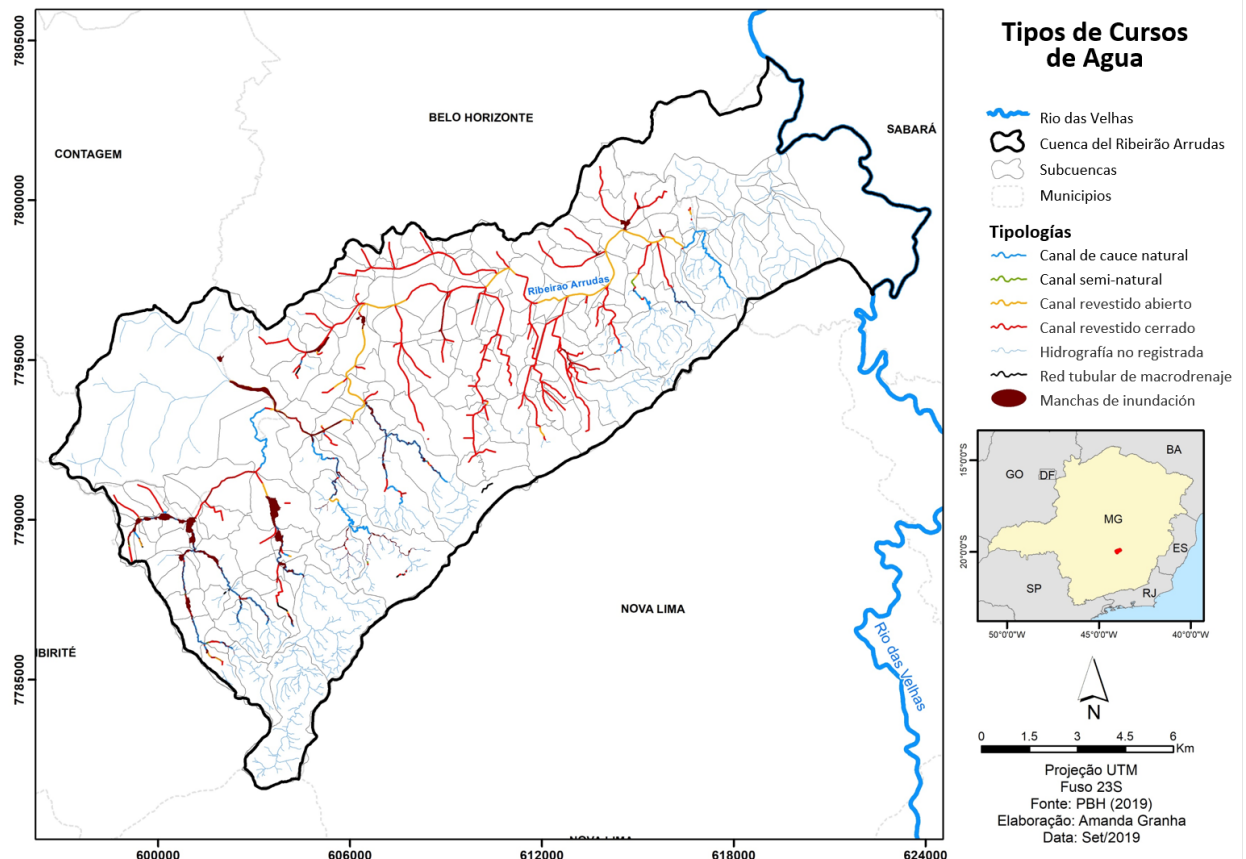
Figura 10: Cráter en la Avenida Tereza Cristina, junto a Arrudas, tras las lluvias extremas del 28/01/2020



Fuente: G1 Minas (2020b)

Eventos como estos se vuelven extremadamente preocupantes teniendo en cuenta las tendencias de aumento de eventos extremos de precipitación, como se presentarán a continuación en este estudio, sobre todo teniendo en cuenta la fuerte antropización y alteración del drenaje natural de la cuenca. En la figura 11, es posible observar el contexto actual de la red hidrográfica *belorizontina* en relación a las canalizaciones específica de la cuenca hidrográfica de Ribeirão Arrudas. En la región central de la cuenca predominan las canalizaciones revestidas cerradas y hay una ausencia total de cursos de agua de lecho natural. En cuanto al Ribeirão Arrudas, existen algunos tramos a lo largo de la cuenca donde está canalizado, pero abierto. En estos tramos, la población puede observar lo alterado que está su lecho y la degradación de sus aguas, que dan la impresión de que donde antes había un río, actualmente sólo hay un conducto para aguas residuales. En la figura 11, también es posible observar algunos puntos de inundación mapeados por PBH (2019), lugares donde ni siquiera el mapeo es suficiente para poner fin a los trastornos generados durante las temporadas de lluvia.

Figura 11: Tipología de los cursos de agua



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

Según Borsagli y Bernardes (2015), existen otras propuestas que se desvían del pensamiento favorable a la canalización y dirigen la atención y las inversiones a la región de Ribeirão Arrudas. Más precisamente, los autores mencionan cómo el instrumento de la *Operação Urbana Consorciada* (OUC) puede interferir en el curso de agua. En las propuestas presentadas en el plan urbanístico aprobado de la OUC, en 2015 se preveía la implantación de parques lineales a lo largo del curso del río, como el Parque Linear Leste que, a través de un tratamiento paisajístico, prevé la promoción del uso público del espacio y la valorización del curso de agua. Además de este proyecto, según la PBH (s.f.), existe el *Programa Parque Cachoeira do Arrudas*, que tiene como objetivo la creación de un parque cerca del único tramo del arroyo donde hay una cascada, promoviendo una valorización ambiental de la zona para el ocio y la recreación. Sin embargo, no es posible encontrar ningún avance de estos proyectos en fuentes oficiales, lo que también demuestra la discontinuidad política de los proyectos medioambientales del municipio.

Según la PBH (2020), considerando los elevados valores invertidos y los recurrentes problemas de inundaciones en el municipio, la crisis del actual sistema de drenaje de Belo Horizonte puede ser vista desde tres aspectos: el costo ambiental, el costo financiero y el inadecuado funcionamiento de la macro red de drenaje. El primero es la exclusión de los cursos de agua del paisaje urbano, que hasta 2020 comprendía más de 200 km de cursos de agua canalizados, obras que se han realizado a lo largo de la historia del municipio por diversas razones ya mencionadas. El costo financiero debido a la poca disponibilidad de recursos financieros por parte del municipio o del gobierno federal para seguir ejecutando obras estructurales de control de inundaciones, que generalmente son muy costosas, además de los costos inherentes a su mantenimiento. Vale resaltar que, en este punto, el documento da a entender que sólo se refiere a la infraestructura gris. Por último, el mal funcionamiento de las infraestructuras de drenaje. Entre las causas del mal funcionamiento de muchos de estos canales se encuentran la metodología de cálculo utilizada originalmente en su diseño, la urbanización acelerada, la interferencia con otros componentes de la infraestructura urbana, como la red de recolección de aguas residuales, las tuberías de agua y el vertido inadecuado de residuos sólidos, así como los problemas de sedimentación y ocupación de las orillas por parte de la población de bajos ingresos.

La creación y expansión urbana de Belo Horizonte implicó varias adaptaciones urbanas en el entorno natural del municipio. Varias intervenciones en los cursos de agua de la cuenca fueron realizadas como forma de minimizar las inundaciones que han acompañado casi toda la historia de la ocupación urbana de Belo Horizonte. Sin embargo, los problemas de drenaje y las molestias a la población persisten, lo que nos lleva a pensar que las estrategias adoptadas hasta ahora no son las mejores. Estas transformaciones fueron predominantemente sanitarias y excluyentes, y formaron parte del proceso casi estándar de metropolización de las ciudades y disociación territorial. En lugar de preocuparse por el tratamiento eficaz de los vertidos y la preservación de los cursos de agua, el objetivo durante la historia de la ocupación del municipio fue eliminar lo más rápidamente posible de los centros urbanos los vertidos generados por su población. Ahora la capital tiene que lidiar con las consecuencias ecológicas y sanitarias de esta historia de planificación no integrada con su red

hidrográfica. En este contexto, los estudios aquí presentados sobre las ventajas que las SbN traen sobre el drenaje y control de inundaciones se tornan extremadamente relevantes para el contexto urbano de Belo Horizonte.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es presentar el rol que las SbN pueden desempeñar en la construcción de ciudades más resilientes a los efectos del cambio climático en las inundaciones urbanas. Se plantea, a través de simulaciones de los impactos en el comportamiento hidrológico a nivel de cuenca hidrográfica, analizar si tales soluciones funcionan como herramientas efectivas de adaptación climática, lo cual puede traer beneficios no sólo en el buen funcionamiento de las ciudades durante eventos hidroclimatológicos extremos, sino también, aumentando la calidad de vida de su población al incorporar infraestructuras verdes.

1.6.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo están divididos en tres macro áreas y se correlacionan con el objetivo general expuesto anteriormente.

En relación con la incidencia del cambio climático:

- Presentar el contexto del cambio climático y sus proyecciones globales y regionales del área de estudio;
- Ejemplificar eventos climáticos extremos y mostrar sus tendencias de incremento a escala global y regional.

En relación con las buenas prácticas de resiliencia urbana se plantea:

- Contextualizar los conceptos de resiliencia urbana, adaptación y SbN;
- Ejemplificar posibilidades de soluciones basadas en la naturaleza, que actúan como soluciones de adaptación frente a las inundaciones;
- Presentar ejemplos de SbN ya implementadas en el mundo.

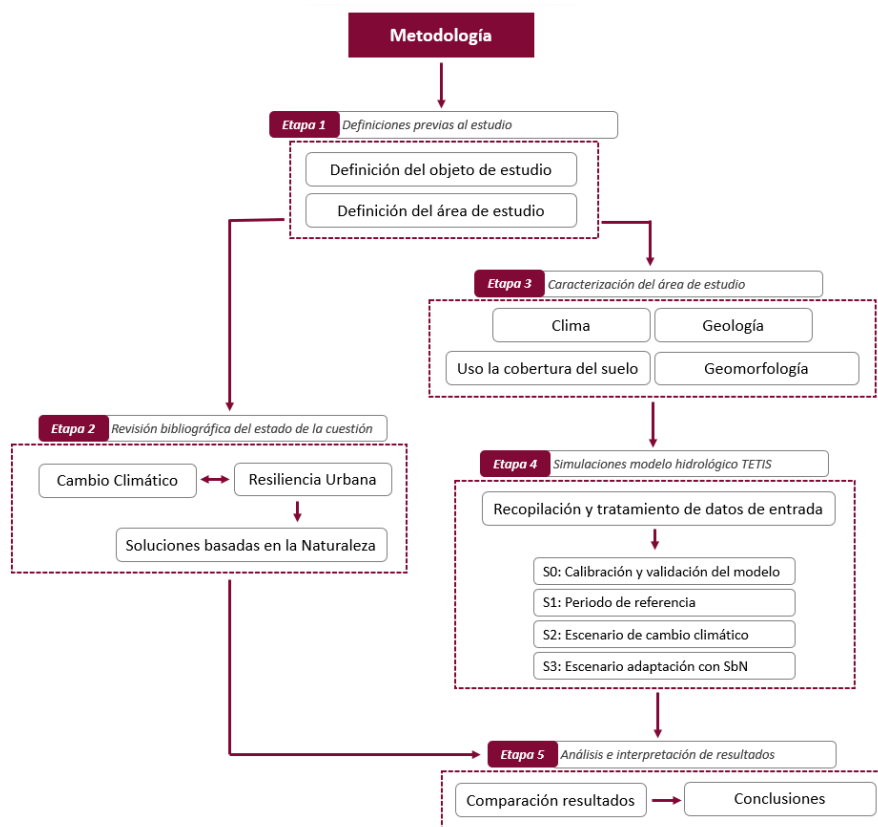
En relación con la cuenca del Ribeirão Arrudas se propone:

- Contextualizar los principales factores de la cuenca hidrológica del Ribeirão Arrudas que influyen en la hidrología e inundaciones urbanas;
- Probar el impacto de la implementación de SbN sobre el drenaje de la cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas, comparando la situación de referencia actual con los escenarios de cambio climático SSP2-4,5 y SSP5-8,5, utilizando el modelo hidrológico TETIS.

1.7. Metodología

Como forma de probar la hipótesis de que las SbN funcionan como herramientas de adaptación, contribuyendo en la construcción de un territorio y ciudad más resiliente, se plantearon cinco fases³ para el desarrollo de la investigación (FIG. 12).

Figura 12: Metodología aplicada en etapas



Fuente: Autoría propia

³ La organización de la metodología tuvo en cuenta el trabajo realizado en Silva (2019), siendo el presente estudio una continuación de investigación del mismo territorio.

En la etapa 1, la elección del tema resiliencia urbana y adaptación, más precisamente del rol de las SbN como objeto de estudio, se justifica por la urgente necesidad del desarrollo de infraestructuras y herramientas en los medios urbanos, que sean capaces de restaurar el equilibrio metabólico y ejercer resiliencia ante las alteraciones que se proyectan en escenarios futuros de cambio climático. Por fin, delimitado el tema, se define el territorio de la cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas, por su importante red hidrográfica y por estar muy antropizada, ya que es la cuenca en la que surgió y se expandió el municipio de Belo Horizonte, una de las ciudades más pobladas del Brasil actualmente. Como ya se ha mencionado, el curso de agua principal de la cuenca, el propio Ribeirão Arrudas, ejerció protagonismo en el histórico de ocupación urbana de Belo Horizonte, ya que fue inicialmente un elemento integrador e inductor de la urbanización. Por eso, en este trabajo hay un interés mayor en elegir esa cuenca como área de estudio. La cuenca es un ejemplo de desequilibrio metabólico por el alto grado de urbanización y los frecuentes episodios de inundación. Además, es una cuenca que todavía no incluye herramientas naturales que podrían ayudar en la adaptación ante el cambio climático, por eso, el incremento de su resiliencia con tales soluciones se convierte en un campo de estudio relevante.

En la etapa 2 se construye el marco teórico de la investigación con dos temas principales: cambio climático y resiliencia urbana. Se ha procurado que las referencias bibliográficas utilizadas fuesen diversas, reuniendo autoridades de cada tema desarrollado. Se utilizó como método la investigación bibliográfica y documental, por la busca de artículos, libros, informes y otros documentos relevantes para el estudio en los idiomas español, portugués e inglés.

Para el cambio climático en escala global, la fuente principal fueron los informes desarrollados por el IPCC, principalmente el AR4 y el AR6, y autores citados en estos documentos. Para aspectos regionales del Brasil o más locales como, por ejemplo, para Minas Gerais, estado dónde la cuenca está ubicada, la construcción de la narrativa consideró documentos de organizaciones como el *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas* (PMBC), como autoridad en el tema, y autores como Reboita *et al.* (2018), Reis *et al.* (2018), Natividade, Garcia y Torres (2016) y Ballarin *et al.* (2023), por plantearen investigaciones cuantitativas regionales.

Para la sección sobre resiliencia urbana, los autores fueron diversos y se eligieron en función de la necesidad de abordar primero el tema de forma más generalizada, para después introducir los conceptos de adaptación al cambio climático y SbN. En esta última parte, se ha buscado aportar ejemplos de tipologías y de estudios de casos que acrediten de sus beneficios.

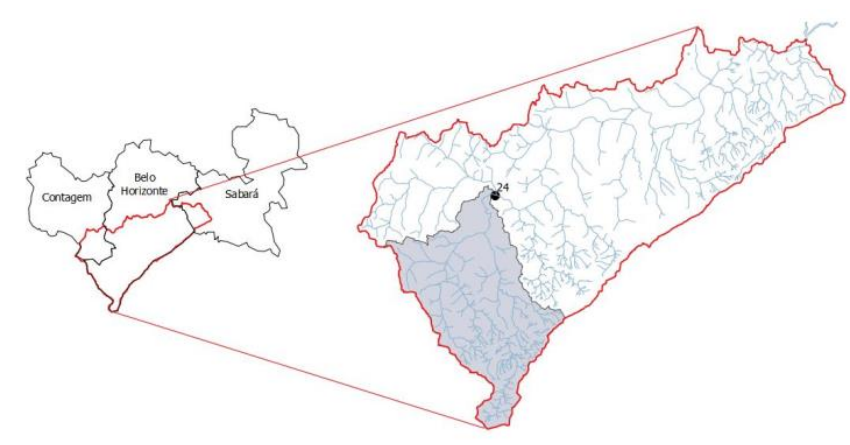
En la etapa 3, para que fuera posible hacer la caracterización de los aspectos generales y de los principales factores geofísicos de la cuenca correlacionados con el clima y el drenaje se utilizaron diferentes bases de datos. La escala de análisis varió en función del aspecto analizado. Para caracterizar el clima, se utilizaron medias mensuales de 1991 a 2020 de datos de presión atmosférica, temperatura (media compensada, máxima y mínima), humedad relativa, precipitación total, evaporación de piché y velocidad media del viento. El horizonte temporal utilizado fue de 30 años por ser el período definido para clasificaciones climatológicas. Los datos se obtuvieron de la estación convencional 83587 denominada "BELO HORIZONTE" con latitud -19.93, longitud -43.95 y altitud 915,47 m, disponibles en el *Banco de Datos Meteorológicos* (BDMEP) del *Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET) (2023). Además, se amplió el marco temporal para incluir datos mensuales de precipitaciones y temperaturas desde 1931, como forma de demostrar la evolución de estos dos factores a lo largo del tiempo. La base de datos anterior a 1961 fue proporcionada por Assis (2023).

Para los factores geofísicos se utilizó bases cartográficas como forma de distribuir espacialmente sus respectivas características. La unidad espacial de análisis utilizada fue la cuenca y sus adyacencias. Las bases de geología/hidrogeología, geomorfología, declividad, altitud, uso y cobertura del suelo fueron obtenidas a través del portal SIGA Rio das Velhas, a través de la herramienta VELHASMAT (SIGA RIO DAS VELHAS, 2023). Adicionalmente, se desarrolló sobre cada elemento sus características físicas y cómo esas se correlacionan con el objeto de estudio con base en literatura existente. Para la distribución espacial del drenaje, considerando las tipologías de cada tramo de la red hidrográfica de la cuenca, la base de datos utilizada fue proporcionada directamente por la *Diretoria de Gestão de Águas Urbanas* del *Departamento Municipal de Obras e Infraestrutura* – SMOBI, en PBH (2019), pero que para efectos de contextualización el mapa se encuentra en la introducción (Cap. 1) de este trabajo.

Para iniciar la parte práctica del estudio (Etapa 4), se estableció un modelo hidrológico distribuido que permitiese entender el comportamiento del reparto de flujo de agua en la cuenca incorporando la información espacial de mayor detalle disponible (se han descartado modelaciones hidráulicas ya que son muy intensivas en el uso de información topográfica muy detallada y en el coste computacional), fue necesario recopilar datos de series hidroclimáticas históricas y futuras, además de datos cartográficos sobre características clave para las definiciones de clima y drenaje. Las series se dividieron en dos macrotemas: caudales y clima.

Para las series históricas de caudal, debido a la falta de mediciones directa de este elemento, fue necesario estimar los valores, que son fundamentales para la calibración y validación del modelo. Para ello, se solicitaron mediciones históricas de nivel del agua directamente a la DGAU del municipio de Belo Horizonte (PBH, 2023a). Se dispuso de datos de varios puntos de control con un intervalo medio de 10 minutos desde el 07/10/2011, 01:00:00, hasta el 02/02/2023, 09:20:00, fecha en que se compartió la base de datos. En una búsqueda bibliográfica se encontró el artículo “ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DE CURVAS-CHAVES GERADAS PELO MODELO HEC-RAS E SWMM” de Ventura, Moura y Fernandes (2017), que determina curvas de aforo para la estación fluviométrica 24 de la cuenca Arrudas, correlacionando la variable ya obtenida, el nivel de agua, con la variable necesaria para las simulaciones, los caudales. La ubicación de la estación 24 dentro de la cuenca del Arrudas puede verse en la figura 13.

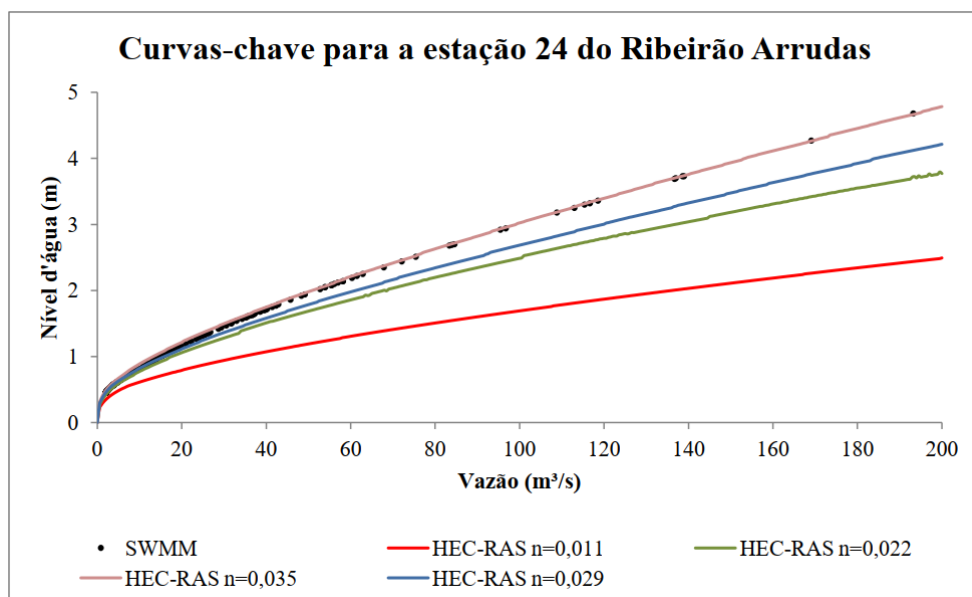
Figura 13: Localización de la estación fluviométrica 24



Fuente: Ventura, Moura, Fernandes (2017)

La curva elegida fue la que coincidía con "n" 0,035 en el modelo HEC-RAS, que era el coeficiente de Manning próximo a los resultados simulados por SWMM cuando calibrado con "n" igual a 0,029 (GRÁ. 2). Tal curva fue considerada como más próxima del comportamiento real del *ribeirão* en el artículo, así como el valor de "n" igual a 0,29, ya que en el modelo SWMM, además de tenerse en cuenta las características hidrológicas de la cuenca, la propagación en el cauce se realiza en régimen no permanente, que suele ser más cercano a la realidad.

Gráfico 2: Curvas clave de la estación fluviométrica 24 generadas por HEC-RAS y SWMM, donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning



Fuente: Ventura, Moura, Fernandes (2017)

Para poder estimar los caudales con los datos ya disponibles, la curva elegida fue dividida en tres tramos, de modo que las curvas de tendencia pudieran definirse con la mayor precisión posible. Extraídas las tres ecuaciones diferentes, fue posible estimar la serie histórica de caudales a partir de los datos de nivel y agregarlos a nivel diario, ya que los datos de proyección son diarios. Cabe destacar que, debido a la falta de datos para algunos días u horas, se utilizó el valor "-1" en TETIS para seguir con la simulación.

Teniendo en cuenta que la curva de aforo es una herramienta teórica para caudales contenidos dentro de canales y que se queda obsoleta en episodios de desbordamiento (inundaciones), donde la geometría y la rugosidad de las riberas y las llanuras de inundación son totalmente diferentes de las del cauce (requiriéndose en esos casos un análisis hidrológico-hidráulico), se estimaron los valores máximos posibles

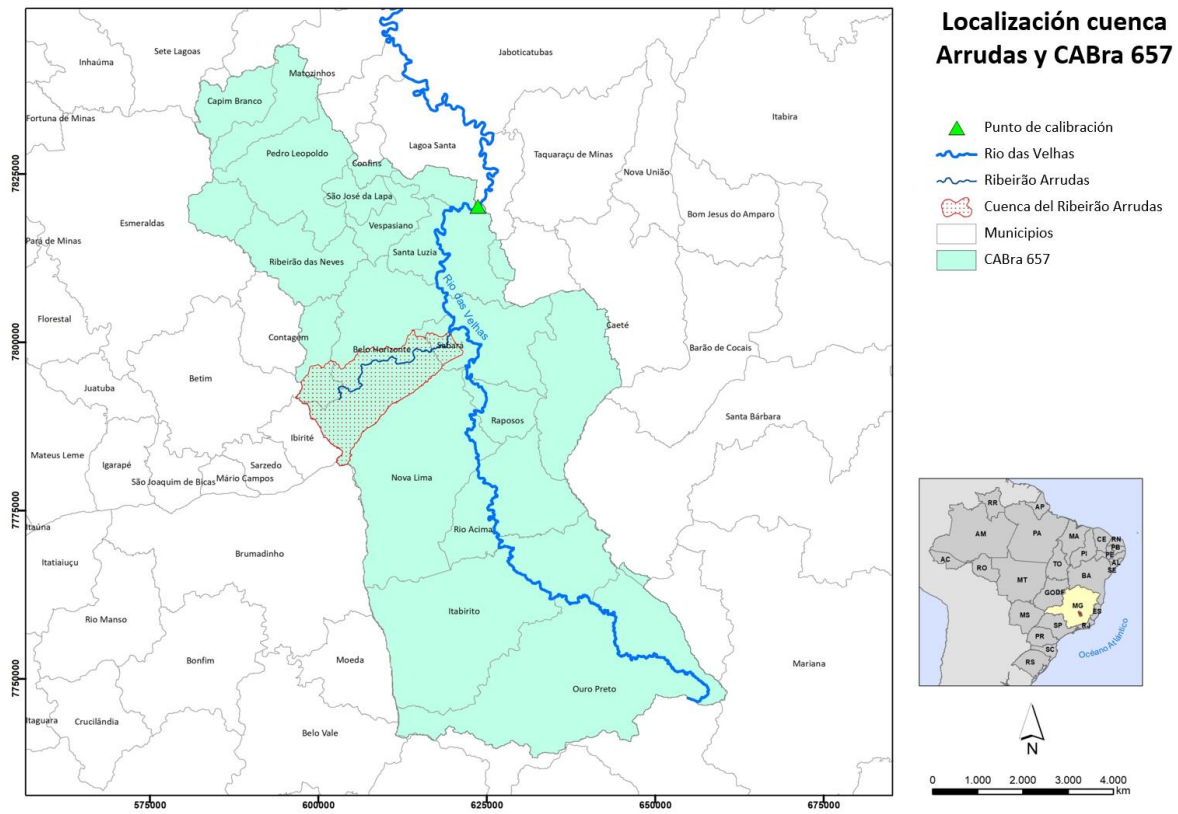
que pueden circular por el canal sin que haya desbordamiento para que el estudio hidrológico fuese robusto. Considerando la fórmula de Manning para el cálculo del caudal, con los datos de la geometría del canal - considerada como aproximadamente rectangular - en el punto 24, facilitado por el ayuntamiento (PBH, 2023b), "n" igual a 0,029 y una pendiente de 7 m/km según lo constatado por los autores, se obtiene un orden de magnitud de aproximadamente 500 m³/s. Por lo tanto, en la agregación diaria de los valores de caudal sólo se tuvieron en cuenta los valores inferiores a 500 m³/s de caudal instantáneo (intervalo de 10 minutos). También cabe mencionar que no fue posible comprobar la veracidad de todos los demás valores de nivel compartidos, ya que puede haber fallos de medición incluso en casos de ausencia de desbordamiento. Un ejemplo de anomalía identificada es el cambio del caudal base en octubre de 2013, cuando pasó de unos 0,3 m³/s a unos 5 m³/s, sin razón aparente, ya que las obras realizadas en el arroyo se encuentran aguas abajo del punto de monitoreo.

Para las series históricas climáticas se utilizó la misma base de datos INMET (2023) para la estación "BELO HORIZONTE" (83587), pero esta vez extrapolando a partir de los primeros datos registrados disponibles en el portal, ya que cuanto más completa sea la serie histórica, más fiel a la realidad podrá ser la simulación. Para datos de temperatura (máxima, media y mínima) la primera medición diaria disponible es del 01/01/1961 y la última, considerada en este estudio, es del 30/09/2023. Dichos datos se incorporan en el modelo hidrológico convirtiéndolos a Evapotranspiración Potencial o de Referencia como se describe luego. Adicionalmente, para demostrar la hipótesis aquí propuesta, era necesario definir series climáticas históricas y futuras de una misma fuente para reducir las fuentes de incertidumbre en la comparación. Aunque existen series históricas mensuales observadas por el INMET, las series modelizadas por Ballarin *et al.* (2021) fueron elegidas para que si pudiera observar las variaciones utilizando el mismo modelo.

A efectos del establecimiento del modelo hidrológico, la serie histórica que cuenta con valores pluviométricos y de nivel medidos en la estación fluviométrica 24 para el mismo periodo 2011-2023 ha sido la considerada para la calibración y validación del modelo.

Ballarin *et al.* (2021) proporcionaron una base de datos climáticos basados en modelos regionales del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) para 735 cuencas hidrográficas que cubren el territorio brasileño y las adyacencias definidas en las *Catchments Attributes for Brazil* (CABra) (ALMAGRO, 2023). Más información sobre el estudio de Ballarin *et al.* (2021) y (Ballarin *et al.*, 2023) en la sección 2.4. Para identificar cuál de las 735 cuencas listadas está más próxima a los límites de la cuenca del Ribeirão Arrudas, se utilizó el software QGIS para superponer el área de estudio y las cuencas definidas en la base de datos del CABra. Como resultado, se observó que el área de estudio está incluida en la cuenca 657 en la cual se puede ver la ubicación exacta y los territorios superpuestos de la cuenca del Arrudas y del municipio de Belo Horizonte, y sus demás cuencas, en la figura 14. La base de datos CLIMBra también proporciona datos de malla con una resolución espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, pero debido a las dificultades operativas y computacionales de utilizar estos datos, en este estudio se utilizaron las proyecciones de temperatura (máxima, media y mínima) y precipitación de 2015 a 2100 de la cuenca 657, así como sus datos históricos de 1980 a 2013, a efectos comparativos. Teniendo en cuenta la posición de las dos cuencas, las proyecciones a escala territorial se consideran suficientemente aproximadas. En la figura 14, también se puede ver la ubicación del punto de incorporación de datos de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET0) en TETIS para los escenarios de cambio climático de CABra.

Figura 14: Localización de la cuenca del río Arrudas en relación con CABra 657



Fuente: Autoría propia

Además, utilizando el método Hargreaves (EC. 1) (ROMÁN, 2023), fue posible estimar la evapotranspiración de los datos modelados históricos y futuros, a partir de los datos de temperatura media, media entre la temperatura máxima y la mínima.

$$ET_0 = 0,0135 (t_{med} + 17,78) R_S \quad (\text{Ecuación. 1})$$

Donde:

ET_0 = evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

t_{med} = temperatura media (°C)

R_S = radiación solar incidente (mm/día)

Los datos de radiación solar incidente deben variar según el mes y se definen en función de la latitud del lugar de estudio. Para Belo Horizonte, estos valores se tomaron de una tabla disponible en el Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca (ROMÁN, 2023). Considerando que la latitud de los extremos norte y sur de la cuenca son más próximas a la latitud 20, los valores considerados para cada mes del año fueron,

respectivamente: 17,1; 16,3; 14,9; 12,8; 10,9; 9,8; 10,2; 11,8; 14,0; 15,8; 16,8; y 17,2. En ausencia de datos diarios de temperatura, se utilizó el valor "-1" para la evapotranspiración potencial en la construcción de la serie temporal (lo mismo se hizo para el caso de los datos de caudal y precipitación).

Además de las series históricas, se utilizaron bases cartográficas. Los datos espaciales utilizados fueron: modelo digital del terreno (MDT), profundidad del suelo hasta la roca madre, capacidad de campo y punto de marchitez, delimitación de la cuenca e hidrografía, coberturas y uso del suelo, suelos, geología/hidrogeología, evolución de la mancha urbana y propuestas de implementación de SbN. Para el MDT, se extrajeron del portal EARTHDATA de la NASA (2022) cuatro cuadrángulos del satélite ASTER, que en conjunto cubren el territorio de este estudio y sus alrededores. La profundidad del suelo hasta la roca madre fue extraída del portal SoilGrids (HENGL *et al.*, 2017). Los mapas de capacidad de campo y punto de marchitez fueron extraídos de la base de datos HiHydrosolis de Simons, Koster e Droogers (2020) y sirvieron para elaboración del mapa de contenido de agua. La delimitación de la cuenca y su red hidrográfica se obtuvieron directamente de la DGAU (PBH, 2019). Las bases de ocupación y uso del suelo, geología/hidrogeología fueron las mismas usadas para caracterización de la cuenca, obtenidas del portal VELHASMAT (SIGA RIO DAS VELHAS, 2023). Debido al bajo nivel de detalle de la base de datos de uso y ocupación del suelo disponible en el portal VELHASMAT utilizado para caracterizar la cuenca en el tema 4, el mapa de este elemento incorporado al modelo TETIS fue el resultado de un cruce de bases de datos. Los datos de la base de datos HILDA+ *Global Land Use Change* de Winkler *et al.*, (2020) para las regiones de Contagem y Sabará se incorporaron a la de mancha urbana más actualizada - 2018 - de Belo Horizonte del portal BH MAP de la PBH (2023), de modo que fue posible definir la distribución de impermeabilización del suelo con mayor detalle.

Para las bases de las propuestas de implantación del SbN, se adaptaron diferentes bases para crear una capa vectorial de propuesta final con cubiertas verdes, y jardines de lluvia. Para las cubiertas verdes se utilizaron las bases de datos de edificios de los municipios de Contagem - portal GeoContagem (PREFEITURA DE CONTAGEM, 2023) - y Belo Horizonte - portal BH MAP (PBH, 2023). No fue posible encontrar el mismo tipo de información para Sabará, pero debido a la poca relevancia de su área urbana en

el contexto general de la cuenca, no se lo consideró esencial para las simulaciones. Considerando la imposibilidad de analizarlos individualmente debido al tamaño del área de estudio y a la variedad de superficies de los tejados, tanto en tamaño como en geometría, lo que impediría la viabilidad técnica de la implantación de cubiertas verdes, así como la dificultad económica de su implantación para gran parte de la población, se definió una lógica de filtraje. Teniendo en cuenta que las superficies mínimas que se pueden considerar en el modelo TETIS son de 156,25 m², se eliminaron los polígonos con superficies inferiores a este valor y, luego, se calculó la mediana del restante, definiéndola como el límite inferior final de la muestra a ser considerada para implementación de cubiertas verdes. Más allá de los límites técnicos de la simulación, la exclusión de los valores de área pequeña tiene sentido teniendo en cuenta que los tejados más pequeños pueden ser generalmente más complejos geoméricamente, como los tejados coloniales, y que las poblaciones con condiciones socioeconómicas más desfavorables tienden a vivir en edificaciones más pequeñas, que por lo tanto probablemente no podrían adoptar un tejado verde si se tratara de una iniciativa privada. Además, cuanto mayor sea la superficie disponible, menor esfuerzo de inversión por economía de escala y más eficaz tenderá a ser la medida. Cabe señalar que, incluso con este filtrado, es probable que exista una sobreestimación de la superficie disponible para cubiertas verdes teniendo en cuenta el contexto político y socioeconómico local, y que algunos elementos de las bases obtenidas de los ayuntamientos son terrenos baldíos o superficies de una sola planta. No fue necesario incluir los índices de conductividad hidráulica porque, a efectos de simplificación operacional, se consideró que las cubiertas verdes funcionaban como “reservorios” con la máxima capacidad de almacenamiento. Para ello, se consideraron las dimensiones de profundidad definidas en PBH (2022a).

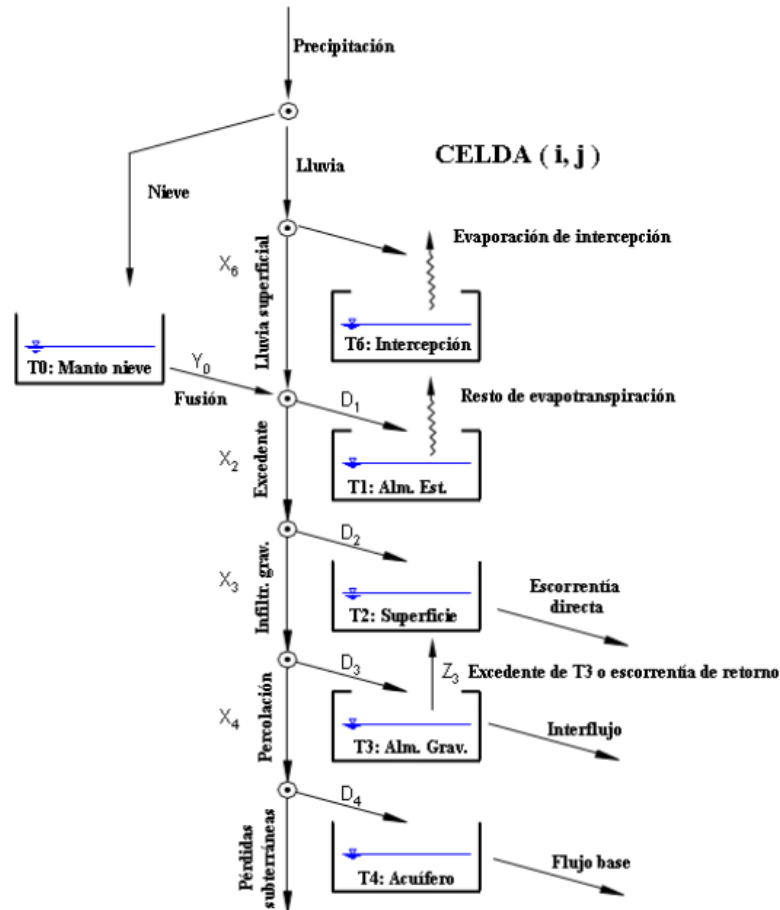
Las otras SbN, los jardines de lluvia, fueron elegidos porque se tratan de una medida que puede adaptarse fácilmente a cada lugar y que es más fácil de mantener que las demás medidas enumeradas en la sección 3.2. La base fue adaptada mediante la superposición de otras que mapean áreas verdes en Belo Horizonte. Las bases utilizadas fueron las de plazas, parques municipales y el programa BHVerde, que sirvió para identificar áreas que ya funcionan como zonas de alta permeabilidad y que ya han

sido incluidas, con tales propiedades, en la caracterización del uso y la cobertura del suelo. Para los demás municipios, no fue posible encontrar datos que sirvieran para el mismo fin. Se buscaron en imágenes de satélite y se dibujaron manualmente en la herramienta QGIS otras posibles zonas, de diversos tamaños y geometrías, en las que también podrían implantarse estas soluciones, o soluciones similares. Los criterios de selección incluyeron la diferenciación entre áreas públicas y privadas, considerando que es más fácil intervenir en áreas públicas, con la excepción de algunas áreas privadas sin uso aparente pertenecientes a instituciones educativas, gubernamentales, militares, hospitalarias o de empresas grandes, que podrían actuar a favor de la adaptación climática del territorio. Por lo tanto, consideramos un escenario optimista de posibles incentivos económicos públicos para la implantación de SbN en áreas privadas. Además, se buscó identificar las zonas públicas remanentes del tejido urbano, priorizando los espacios que ya pertenecían a la infraestructura urbana, como los parterres, las plazas, los parques, las bordas de los cursos de agua, canalizados o no, y de la línea férrea. Cabe señalar que en algunos casos en los que la viabilidad de la aplicación era dudosa, se utilizaron imágenes de Google *Street View* basadas en las coordenadas geográficas obtenidas en QGIS, pero no fue posible verificar la viabilidad técnica según el tipo de propiedad (pública o privada) o la declividad para todas las zonas propuestas. En total, se cartografiaron 1.601 polígonos en toda la cuenca, por lo que se considera un escenario optimista del potencial de la inclusión del SbN y la adaptación climática. Sin embargo, como se señala en el apartado 5.3, debido al tamaño de las celdas consideradas en el modelo TETIS (12,5 x 12,5 m), en la modelización sólo se tuvieron en cuenta las superficies superiores a 156,25 m². Tampoco fue necesario incluir los índices de conductividad hidráulica, ya que se consideró que las mediciones funcionaban como reservorios. Las dimensiones consideradas fueron las presentes en PBH (2022a). En total, con cubiertas verdes y jardines de lluvia, se han propuesto intervenciones en cerca del 7% de la superficie de la cuenca del Ribeirão Arrudas.

Una vez extraídos, tratados y recopilados los datos, se utiliza el modelo hidrológico TETIS, versión 9, para simular tres escenarios diferentes en el área de estudio. El modelo considera que la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda del territorio (12,5 m x 12,5m en este

estudio), asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí, como es posible observar en la figura 15. Tales tanques representan conceptualmente la producción de escorrentía como una unidad de respuesta hidrológica (GIMHA, 2021).

Figura 15: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS

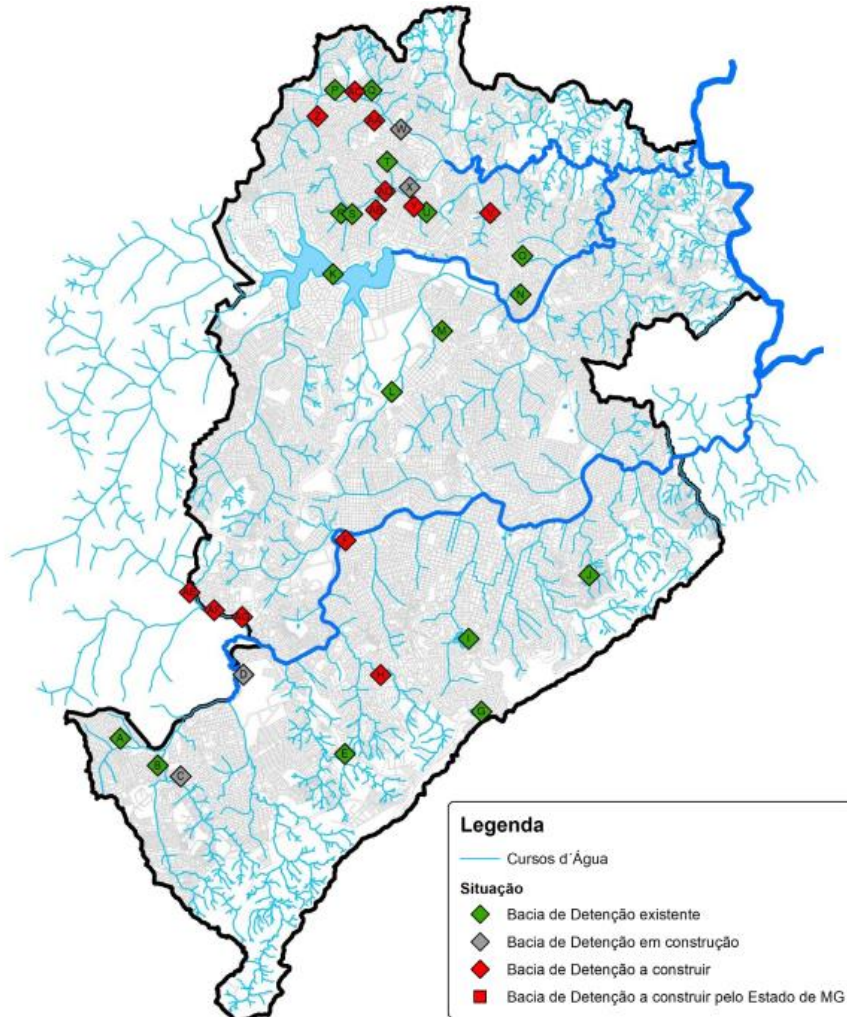


Fuente: GIMHA (2021)

Otro factor de entrada relevante en la simulación hidrológica en TETIS es la existencia y ubicación de embalses o lagos, junto con sus variables, ya que son puntos de control del hidrograma que circula por el cauce y, dependiendo del tamaño relativo del embalse frente al volumen de la crecida, el efecto registrado puede ser pequeño o muy importante (GIMHA, 2021). Considerando la distribución de estos elementos en la figura 16, fue posible identificar la existencia de 6 embalses en la región de la cuenca del Ribeirão Arrudas: Túnel/Camarões (A), Jatobá (B), Bonsucesso (E), Lagoa Seca (G), Barragem Santa Lúcia (I) y Cardoso/Mem de Sá. Sin embargo, para tenerlos en cuenta en la simulación, sería necesario disponer de datos de cota-área y cota-volumen y series

históricas de su evolución, que no fue posible encontrar. A efectos de la metodología aquí propuesta, tales elementos no tienen tanto impacto por su tamaño en el territorio, además que el resultado más relevante es la comparación entre escenarios, ninguno de los cuales incorporó dichos embalses.

Figura 16: Localización de embalses existentes, en construcción o por construir en el municipio de Belo Horizonte



Fuente: PBH (2022b)

Una vez recopiladas y procesadas todas las series históricas y futuras, así como los datos cartográficos, se iniciaron las simulaciones de los escenarios propuestos en este estudio. En primer lugar, fue necesario calibrar y validar el modelo para garantizar que las simulaciones con las variables aquí propuestas, escenarios de cambio climático y SbN, pudieran ser representativas del territorio en cuestión. Una vez realizados los ajustes necesarios para que el modelo fuera aceptable, se procedió a las simulaciones. En el primero, se simula lo que sería un contexto de dinámica hidrológica de la cuenca para un período de referencia (1980-2013) con la cobertura del suelo según el mapa

hecho con la base de manchas urbanas de PBH (2023), para el año más actual – 2018 - y datos de la base HILDA+ de Winkler *et al.* (2020) para complementar para los otros dos municipios. En seguida, sobre la base de las proyecciones científicas futuras de cambio climático de para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5 para el periodo de 2015-2100. Finalmente, como manera de probar la hipótesis planteada por este estudio, se hace las simulaciones en escenario de implementación de SbN, o sea, en un contexto de incremento de la resiliencia urbana frente a las inundaciones por la implementación de cubiertas verdes y jardines de lluvia. Tanto los datos climáticos del periodo de referencia como los escenarios de cambio climático se tomaron de Ballarin *et al.* (2023). Además, los caudales resultantes se midieron en tres puntos distintos de la cuenca, con diferentes zonas de contribución y, por tanto, diferentes impactos de la aplicación del SbN. Más detalles sobre las simulaciones en el tópico 5 y la descripción detallada de la implementación del modelo hidrológico en el Anexo.

Por último, en la etapa 5, se plantea el análisis de los datos obtenidos en las simulaciones hechas, comparándolos y, con eso, desarrollando una discusión acerca de los resultados. En las conclusiones se vuelve a la hipótesis inicial y se presenta también recomendaciones coherentes con los datos obtenidos considerando el contexto local actual.

El formato y la organización de las referencias bibliográficas siguieron las normas vigentes de la *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (ABNT), norma 6023/2018, que establece los elementos que deben incluirse en las referencias, así como el orden en que deben presentarse.

2. Aproximación al cambio climático como fenómeno físico: escenarios previstos

En este capítulo se propone traer referentes teóricos que contextualizan y fomentan la hipótesis y construcción de la narrativa de este estudio. De esa manera, a principio, se presenta, sobre una óptica científica, una contextualización histórica del fenómeno del cambio climático y sus principales proyecciones en escala global y regional para el caso de estudio.

El cambio climático es una temática ampliamente estudiada en diversas partes del mundo y como en cualquier otro campo de estudio, los descubrimientos pasados

fomentan nuevos hallazgos y perfeccionamiento científicos. Desde sus procesos históricos de formación hasta proyecciones de escenarios futuros, científicos de todo el mundo continúan compartiendo datos que tienen como uno de sus objetivos ayudar a los gobiernos, las empresas y la sociedad civil a tomar decisiones que reduzcan los efectos del cambio climático sobre el medio ambiente.

Los principales impulsores humanos del cambio climático son el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y de aerosoles procedentes de la quema de combustibles fósiles o derivados de cambios en el uso del suelo. Los gases de efecto invernadero tienen ese nombre porque atrapan la radiación infrarroja cerca de la superficie, calentando el clima en esa zona. Ya los aerosoles, como los producidos naturalmente por los volcanes, en promedio enfrían el clima por sus partículas aumentaren la reflexión de la luz solar. A lo largo de los años, múltiples líneas de evidencia demuestran que los impulsores humanos son la causa principal del cambio climático reciente (IPCC, 2021).

2.1. Contexto histórico del cambio climático

Las dinámicas del clima existen mucho antes de que la humanidad tuviera medios para medir, o simular, sus diversos aspectos. Así como indicado por IPCC (2007), una característica de las ciencias de la tierra es que nos es posible para los científicos conducir experimentos controlados en una escala planetaria y observar los resultados. Todavía, en ese contexto, escritores como Schellnhuber *et al.*, (2004) *apud* IPCC (2007), argumentan que sería justamente experimentos de esa magnitud, que incorporan la complejidad de la interacción entre los diversos procesos planetarios, que idealmente sería necesario para verificar o rechazar una hipótesis de cambio climático. Sin embargo, con el desarrollo de numerosas pruebas empíricas de hipótesis en las últimas décadas se ha construido un relevante marco teórico del tema. Sus aspectos, desde la circulación oceánica profunda hasta la química estratosférica, fueron siendo refinados y mejor comprendidos con las pruebas repetitivas, y con las combinaciones de observaciones y modelos que testan hipótesis a escala planetaria (IPCC, 2007).

Otro factor fundamental para la construcción de ese marco teórico es la aceptación gradual de evidencias de eras geológicas anteriores. Según IPCC (2021), a

partir del siglo XIX hubo una aceptación progresiva de datos derivadas de investigación de fósiles y estratos geológicos que, junto a otros descubrimientos, indican grandes cambios en el clima de la Tierra, desde las eras de hielo hasta períodos mucho más cálidos, a través de miles a miles de millones de años. Con los datos obtenidos, es más fácil identificar y analizar las causas y consecuencias de las variaciones naturales del clima, así como el rol antropogénico en los cambios climáticos.

Aún según la institución, los estudios de la paleoclimatología revelan el papel clave del CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la variabilidad climática del pasado, la magnitud del cambio climático actual en comparación con ciclos glaciales-interglaciares pasados, y los inusuales cambios recientes en el clima. Sin embargo, algunos científicos antes mismo de paleoclimatología ganar fuerza en esos estudios en el siglo XIX, ya habían levantado la hipótesis de influencia antropogénica en el cambio climático. Grove (1995) *apud* IPCC (2021) y Fleming (1998), indican que desde el siglo XVII ya se consideraba eso, con un foco inicial en el papel humano relativo a deforestación y agricultura. Pero fue en el siglo XIX, más precisamente en la década de 1890, que se empezó a calcular los efectos de la variación de CO₂ sobre la temperatura planetaria, en ese momento, asociado principalmente a la quema de carbón. En ese contexto, Arrhenius (1908) escribió que el CO₂ antropogénico, o sea, el resultante de la combustión de combustibles fósiles, podría eventualmente calentar el planeta. Ya en 1958, según IPCC (2007), las mediciones de alta precisión de la concentración de CO₂ atmosférico empezaron y, con eso, lo que antes eran solamente hipótesis, en ese momento fue posible comenzar a ser evaluado de manera más tangible y exacta. Esa serie temporal tiene un status icónico en la ciencia del cambio climático, por evidenciar el efecto de las actividades humanas en la composición de la atmosférica a lo largo de los años. Incluso, por la precisión de las mediciones, permite que los científicos separen las emisiones de combustibles fósiles de las emisiones naturales de los ciclos de la biosfera.

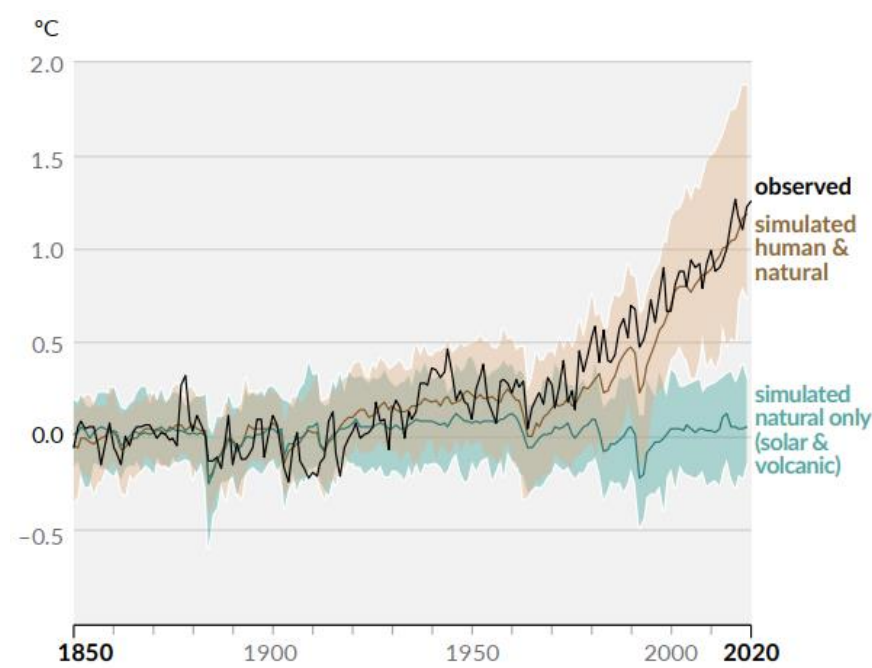
Desde el inicio del siglo XX hasta la actualidad, las evidencias del papel de la humanidad en el calentamiento global han sido cada vez más precisas y difundidas. Las mediciones precisas del último siglo y de este, en conjunto con los datos procedentes de la paleoclimatología, hacen que el cambio de la temperatura superficial sea el

aspecto del clima en que la comunidad científica ha tenido más confianza en los informes de evaluación del IPCC.

Según IPCC (2021), cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier otra década que la haya precedido desde el periodo preindustrial, periodo de referencia definido por la comunidad científica como 1850-1900. La temperatura de la superficie global en las dos primeras décadas del siglo XXI, o sea, de 2001 a 2020, fue 0,99 [0,84 a 1,10] °C superior a la temperatura preindustrial. Ya en 2011-2020 la temperatura de la superficie global fue 1,09 [0,95 a 1,20] °C superior que en 1850-1900. Siendo que, según las mediciones, el aumento de la temperatura superficial mundial general se debe principalmente a un mayor calentamiento de +0,19 [0,16 a 0,22] °C entre 2003-2012.

En el gráfico 3 a continuación, es posible observar un resumen de la evolución de la temperatura global al pasar de los años desde el período preindustrial. El gráfico demuestra el papel antropogénico en la realidad observada, e intensificada, en las últimas décadas ya que solo los factores naturales no podrían resultar en tamañas transformaciones en la temperatura superficial mundial. Las emisiones antropogénicas son las principales responsables por esa variación.

Gráfico 3: Variación de la temperatura superficial mundial (media anual) observada y simulada utilizando factores humanos y naturales y únicamente factores naturales (1850-2020)



Fuente: IPCC (2021)

De acuerdo con IPCC (2021), además, el efecto dominante de las actividades humanas es evidente no solo en el calentamiento de la temperatura superficial global, sino también en el patrón de calentamiento en la atmósfera inferior y enfriamiento en la estratosfera, calentamiento del océano, derretimiento del hielo marino y muchos otros cambios observados. Adicionalmente, la acción antropogénica también viene interfiriendo en el incremento de eventos climáticos extremos.

2.2. Eventos climáticos extremos

Según el IPCC (2021) las evidencias de que el cambio climático inducido por el hombre ya está afectando muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo se fortalecieron en los últimos años. Tales eventos incluyen temperaturas extremas, fuertes precipitaciones, inundaciones, sequías, tormentas y ciclones tropicales. Hay también eventos compuestos considerados como: (i) dos o más eventos extremos que ocurren simultáneamente o sucesivamente, (ii) combinaciones de eventos extremos con condiciones subyacentes que amplifican el impacto de los eventos, o (iii) combinaciones de eventos que no son en sí mismos extremos, pero conducen a un evento o impacto extremo cuando se combinan. Además, es probable que la influencia humana haya aumentado la probabilidad de eventos extremos compuestos desde la década de 1950.

IPCC (2021) define como evento meteorológico extremo: “un evento que es raro en un lugar en particular y tiempo del año”, ya un evento climático extremo como “un patrón de clima extremo que persiste por algún tiempo, como por una temporada”. Sin embargo, según la misma institución, la definición de “raro” es variable según la aplicación. Como, por ejemplo, para algunos estudios un evento es considerado como extremo si no tiene precedentes; y para otros eventos que ocurren varias veces al año pueden ser considerados eventos extremos moderados. Con la influencia antropogénica, la manera de definir la rareza de un evento también ha cambiado, ya que eventos que son sin precedentes en el registro histórico se tornaron bastante probables en las condiciones actuales.

Los eventos extremos se pueden examinar desde dos perspectivas: centrándose en los cambios en la frecuencia de los extremos dados o en los cambios en su intensidad. De toda manera, es un hecho establecido que las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénica son responsables por el aumento de la frecuencia e intensidad de tales eventos se comparada a época preindustrial y que incluso los aumentos en la temperatura relativamente pequeños causan cambios estadísticamente significativos en los extremos a escala global y para las grandes regiones (IPCC, 2021).

2.2.1. Temperatura

De acuerdo con IPCC (2021) las emisiones de gases de efecto invernadero conducen al calentamiento del aire troposférico y la superficie de la Tierra y es el factor dominante para los aumentos en la intensidad, frecuencia y duración de los extremos cálidos y la disminución de los extremos fríos. Este calentamiento general a escala global está modulado por patrones de circulación atmosférica a gran escala, pero también influenciado por las relaciones de la temperatura con la evapotranspiración y albedo, y de fuerzas regionales o locales como cambios en el uso de la tierra y en las concentraciones de aerosoles. Por lo tanto, los cambios en los extremos de temperatura a escala regional y local pueden tener distribuciones espaciales heterogéneas.

Además, el aumento de la temperatura conduce a otras respuestas y reacciones termodinámicas que afectan la atmósfera y la superficie, que pueden influenciar en los eventos climáticos extremos. Según IPCC (2021), estos incluyen un aumento en el contenido de vapor de agua de la atmósfera y un cambio en el perfil vertical de temperatura.

2.2.2. Precipitación

De acuerdo con IPCC (2021), el calentamiento de la temperatura afecta el ciclo hidrológico justamente por ser responsable por cambios en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, ya que aumenta la evaporación y la capacidad de retención de agua del aire. En la escala global, las proyecciones de los modelos climáticos muestran que el incremento del vapor de agua en la atmósfera lleva a fuertes aumentos en los extremos de precipitación en todas partes, con una magnitud que varía entre 4% y 8% por 1°C de calentamiento de la superficie. Ya en la escala regional, los modelos climáticos muestran

que la contribución puede ser sustancial y modificar fuertemente la tasa proyectada de cambio de las precipitaciones extremas (IPCC, 2021).

La precipitación extrema también puede ser incrementada por el calor latente adicional liberado dentro de las tormentas, al fortalecer las corrientes ascendentes convectivas y la intensidad de la circulación ciclónica (IPCC, 2021). Además de eso, según la institución, ha habido nuevas pruebas del efecto de los cambios en el uso de la tierra y la cubierta terrestre sobre las precipitaciones intensas, principalmente sobre ambientes con gran nivel de urbanización. Este efecto se da en consecuencia de cuatro posibles mecanismos: (i) aumentos en la humedad atmosférica debido a la convergencia horizontal del aire asociada con el efecto isla de calor urbano (SHASTRI; PAUL; GHOSH; KARMAKAR, 2015; ARGÜESO; LUCA; EVANS, 2015); (ii) aumentos en la condensación debido a las emisiones de aerosoles urbanos (HAN; BAIK; KHAIN, 2012; SARANGI *et al.*, 2017); (iii) contaminación por aerosoles que afecta la microfísica de las nubes (SCHMID Y NIYOGI, 2017); y (iv) estructuras urbanas que impiden el movimiento atmosférico (SHEPHERD, 2013; GANESHAN; MURTUGUDDE, 2015; PAUL *et al.*, 2018).

2.2.3. Inundaciones

Las inundaciones son resultado de una compleja interacción entre la hidrología, el clima y la gestión humana, y la importancia relativa de estos factores varía según los diferentes tipos de inundaciones y regiones. Inundaciones son eventos históricamente estacionales y naturales, pero en condiciones específicas también pueden ser consideradas como eventos climáticos extremos. Según IPCC (2021), las inundaciones ocurren cuando el agua ocupa tierras normalmente secas y se clasifican en tipos como: inundaciones pluviales, inundaciones repentinas, inundaciones de ríos, inundaciones de aguas subterráneas, inundaciones de oleadas, inundaciones costeras; dependiendo de las escalas de espacio y tiempo y los principales factores y procesos involucrados. Al tratarse de un evento de difícil cuantificación con respecto al área inundada, muchos estudios se centran en los cambios de los caudales como indicadores principales de la magnitud de cada evento.

Las inundaciones pluviales y urbanas, que son el foco de este trabajo, son tipos de inundaciones repentinas resultantes de la intensidad de las precipitaciones que

excede la capacidad de los sistemas de drenaje natural y artificial y pueden estar directamente relacionadas con las precipitaciones extremas (IPCC, 2021). De esa manera, el incremento de la frecuencia e intensidad de precipitaciones extremas son el principal indicador para inferir y proyectar cambios en las inundaciones pluviales urbanas repentinas (a través de modelos hidrológicos que transforman la lluvia en escorrentía), considerando que no haya cambios adicionales en la condición de la cuenca.

2.3. Tendencias del cambio climático con modelos de escala global

Con los diversos desarrollos científicos sobre el pasado y el presente se hace necesario también proyectar sobre el futuro para comprendernos como diversos factores de la actualidad pueden influenciarlo y para que se definan estrategias de mitigación o adaptación. En ese contexto, desde 1992 la comunidad científica modela, difunde y perfecciona escenarios futuros posibles para horizontes temporales distintos. Según el IPCC (2021): “Un escenario es una descripción de cómo puede desarrollarse el futuro, basado en un conjunto coherente e internamente consistente de suposiciones sobre factores determinantes, incluidos la demografía, los procesos económicos e innovación, gobernanza, estilos de vida y relaciones entre estas fuerzas motrices” (IPCC, 2000; ROUNSEVELL; METZGER, 2010; O'NEILL *et al.*, 2014 *apud* IPCC, 2021).

2.3.1. En el calentamiento del planeta

De acuerdo con IPCC (2000), los escenarios integran narrativas cualitativas sobre el futuro y formulaciones cuantitativas basadas en modelos científicos formales. De esa manera, se hacen útiles, para la comprensión del comportamiento de sistemas complejos y, incluso, para la formulación de políticas de actuación. Actualmente, los escenarios difundidos por la comunidad científica y el IPCC son los *Shared Socio-economic Pathways* (SSP), que van de SSP1 a SSP5 variando de acuerdo con las tendencias en la evolución de la sociedad a lo largo del siglo XXI. De acuerdo con IPCC (2021), cada escenario es una descripción de un futuro socioeconómico consistente, plausible e integrado, pero no llevan en cuenta los efectos del cambio climático, y no se asumen nuevas políticas climáticas. Para O'Neill *et al.* (2017) el propósito general de las narrativas es proporcionar descripciones generales de las condiciones futuras que son

relevantes para el análisis de las emisiones y estrategias de mitigación, el análisis de la vulnerabilidad social al cambio climático, los impactos climáticos y el potencial medidas de adaptación.

Uno de los factores más relevantes de los escenarios son las cantidades de emisiones de CO₂ consideradas. Para eso, se realizan estimaciones basadas en niveles hipotéticos futuros de referencia de una amplia gama de factores socioeconómicos, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, urbanización y su amplio espectro de las implicaciones asociadas en materia de energía, uso del suelo y emisiones (RIAHI *et al.*, 2017).

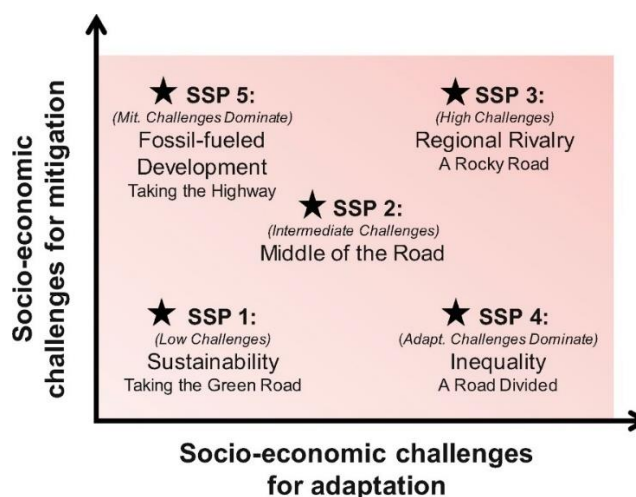
En términos generales, los escenarios SSP1 representan la “sostenibilidad”, los SSP2 un camino “intermedio”, SSP3 una “rivalidad regional”, SSP4 la “desigualdad” y SSP5 un desarrollo intensivo en combustibles fósiles (IPCC, 2021). Según O’Neill *et al.* (2017), hay también como describir los escenarios de acuerdo con sus respectivos desafíos frente a estrategias de adaptación o mitigación:

- **SSP1:** presenta bajos desafíos para la mitigación, en un contexto de eficiencia de recursos y desarrollo de tecnologías respetuosas con el medio ambiente, y bajos también para la adaptación, por la mejora en el bienestar humano, junto con unas instituciones mundiales, regionales y nacionales fuertes y flexibles;
- **SSP2:** presenta desafíos moderados de mitigación y adaptación, por un contexto de fuerte heterogeneidades entre y dentro de los países, y sin relevantes cambios en las tendencias sociales, económicas y tecnológicas históricas;
- **SSP3:** presenta grandes desafíos para la mitigación, por el aumento de la demanda de recursos y la dependencia de los combustibles fósiles, junto con la dificultad para lograr la cooperación internacional y la lentitud del cambio tecnológico, y también para la adaptación por los limitados progresos en materia de desarrollo humano, el lento crecimiento de los ingresos y la falta de instituciones eficaces;
- **SSP4:** presenta bajos desafíos para la mitigación por el desarrollo de tecnología y conocimientos de soluciones de bajo carbono y una clase política y empresarial internacional bien integrada, capaz de actuar con rapidez y decisión, y grandes

desafíos para la adaptación por las economías regionales que seguirán siendo de baja tecnología y sin instituciones eficaces para lidiar con las tensiones económicas o ambientales;

- **SSP5:** presenta grandes desafíos para la mitigación por el uso intensivo de recursos y combustibles fósiles y la falta de preocupación ambiental a nivel mundial, y desafíos bajos de adaptación por el logro de los objetivos de desarrollo humano, el sólido crecimiento económico y la infraestructura altamente eficiente. La figura 17 resume la posición de los escenarios según estos dos criterios:

Figura 17: Cinco SSP que representan diferentes combinaciones de desafíos para la mitigación y la adaptación



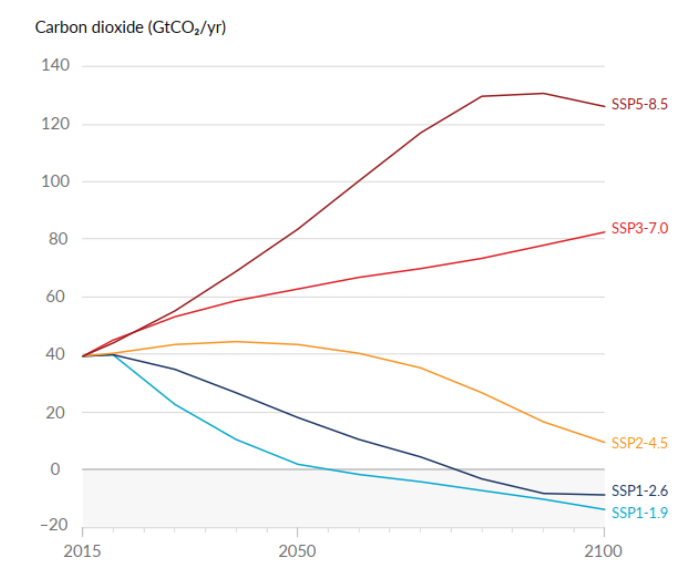
Fuente: O'Neill et al (2017)

El Sexto Informe de Evaluación del IPCC enumera cinco entre los nueve escenarios como principales: SSP1-1,9; SSP1-2,6; SSP2-4,5; SSP3-7,0; y SSP5-8,5; los números que acompañan cada escenario representan las fuerzas radiactivas de cada uno, o sea, las potenciales perturbaciones en el equilibrio energético del planeta expresas en Wm^{-2} . El SSP1-1,9 mantiene el calentamiento a aproximadamente $1,5^{\circ}C$ por encima de la temperatura preindustrial (1850-1900) en 2100 considerando emisiones *net zero* de CO_2 alrededor de la mitad del siglo. El SSP1-2,6 se mantiene por debajo de $2,0^{\circ}C$ de calentamiento en relación a 1850-1900 con emisiones *net zero* de CO_2 en la segunda mitad del siglo. Ya el SSP2-4,5 está en línea con el extremo superior de los niveles agregados de emisiones de *Nationally Determined Contributions* (NDCs) para 2030. En él, las emisiones de CO_2 se mantienen alrededor de los niveles actuales hasta

mediados del siglo. El escenario SSP2-4,5 se desvía ligeramente de un escenario de referencia de “no políticas climáticas adicionales”, lo que resulta en una estimación del calentamiento alrededor de 2,7°C a finales del siglo XXI en relación con 1850-1900. El SSP3-7,0 es un escenario de referencia intermedio a alto resultante de la ausencia de una política climática adicional en el marco de la descripción del desarrollo socioeconómico de la SSP3. En él, las emisiones de CO₂ se duplicaron aproximadamente con respecto a los niveles actuales para 2100 y las emisiones de otros gases son particularmente elevadas, incluidas las emisiones de aerosoles. Finalmente, el SSP5-8,5 que hace referencia a un contexto sin política climática adicional, las emisiones de CO₂ aproximadamente se duplicarán con respecto a los niveles actuales para 2050 (IPCC, 2021). Como ya se ha mencionado, en las simulaciones realizadas en este estudio se consideraron los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5.

Para cada uno de los SSP la comunidad científica prevé una cantidad específica de emisiones de CO₂ hasta en fin del siglo XXI como es posible ver en el gráfico 4.

Gráfico 4: Emisiones futuras anuales de CO₂ para cada escenario SSP



Fuente: IPCC (2021)

Del mismo modo, como consecuencia de las proyecciones de emisiones, se prevé el calentamiento promedio global a corto, medio y largo plazo para cada uno de los escenarios SSP, considerando el rango probable y el calentamiento exacto más probable de acuerdo con la tabla 1.

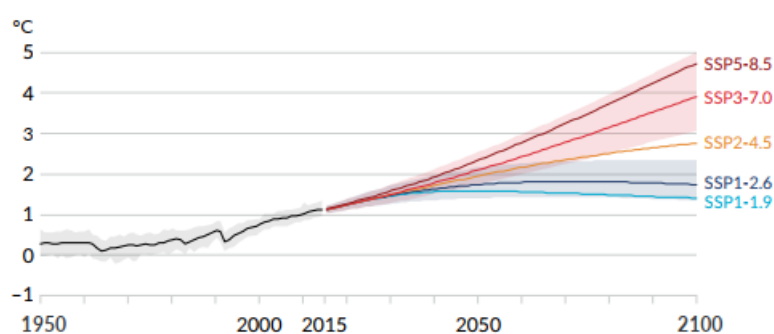
Tabla 1: Cambios en la temperatura superficial global para cada escenario y período de tiempo

Escenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Fuente: IPCC (2021)

En el gráfico 5 se puede observar para cada escenario como cada proyección se desarrolla a lo largo del tiempo basada en las estimativas del calentamiento más probable mostradas en la tabla anterior.

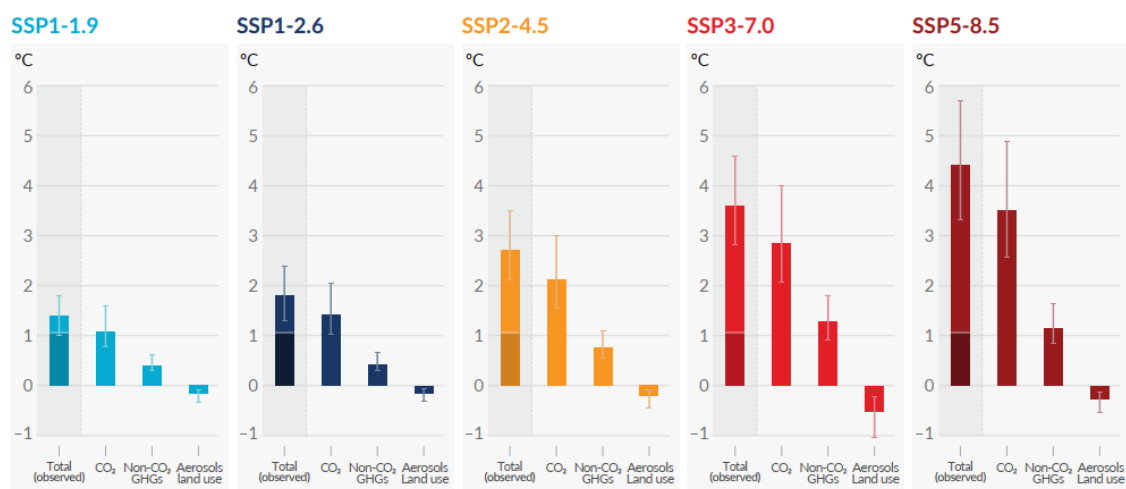
Gráfico 5: Cambio de la temperatura superficial global relativa a 1850-1900 para cada escenario



Fuente: IPCC (2021)

Sin embargo, a pesar del rol importante del CO₂, él no es el único gas de efecto invernadero. En el gráfico 6 es posible observar para cada escenario cuál sería la parcela de contribución de los demás gases y también el rol opuesto que ejercen los aerosoles en el calentamiento comparado al periodo preindustrial.

Gráfico 6: Contribución para el calentamiento de la temperatura superficial global de diferentes emisiones, para cada escenario



Fuente: IPCC (2021)

De todas maneras, como es posible ver en las figuras arriba, la temperatura superficial mundial seguirá aumentando hasta por lo menos mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones considerados. El calentamiento global de 1,5°C y 2°C se superará durante el siglo XXI a menos que se produzcan reducciones profundas en las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en las próximas décadas (IPCC, 2021).

2.3.2. En los riesgos por inundaciones urbanas

Teniendo en cuenta este escenario futuro, como se ha mencionado anteriormente, también se espera un aumento de los eventos climáticos extremos de precipitación y las consiguientes inundaciones, especialmente en las zonas urbanas. Sin embargo, según IPCC (2021) la mayoría de los cambios previstos en el ciclo del agua no serán uniformes ni en el espacio ni en el tiempo ya que están condicionados por procesos dinámicos y termodinámicos que todavía no han aparecido en los registros de observación recientes, dado que se superponen a fluctuaciones naturales del tiempo y el clima. Por lo tanto, proyectar cambios regionales en el ciclo del agua sigue siendo un reto. De todas formas, es prácticamente seguro que la intensidad del ciclo mundial del agua, considerada en términos de precipitación media, evaporación y escorrentía mundiales y continentales, aumentará con el continuo calentamiento global. Se prevé que la precipitación mundial anual sobre la tierra aumente en promedio en un 2,4% [-0,2 a +4,7] % (rango probable) en el escenario de bajas emisiones SSP1-1,9 y en un 8,3

[0,9 a 12,9] % en el escenario de altas emisiones SSP5-8,5 para 2081-2100 en relación a 1995-2014 (IPCC, 2021).

En la tabla 2 es posible visualizar las proyecciones del ciclo hidrológico medio anual global a medio plazo (2041-2060) y a largo plazo (2081-2100) en relación con la base de referencia (1995-2014), con intervalo de confianza de 90%, en los modelos CMIP6 para cada uno de los principales SSP.

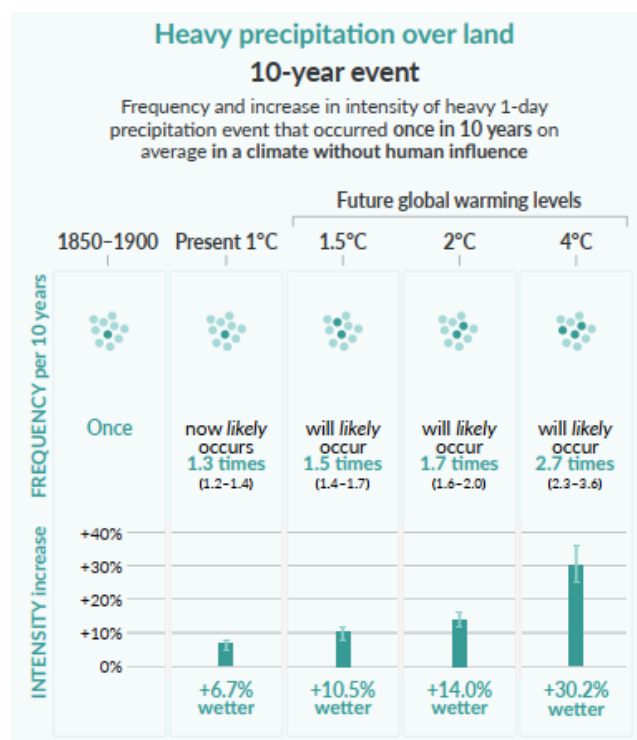
Tabla 2: Proyecciones del ciclo hídrico medio anual de cada escenario para medio y largo plazo

	1995–2014 reference period	Mid-term: 2041–2060 Minus Reference Period					Long Term: 2081–2100 Minus Reference Period				
		SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Global Annual											
Precipitation (mm day ⁻¹)	2.96 [2.76 to 3.17]	0.06 [0.03 to 0.11]	0.07 [0.03 to 0.12]	0.07 [0.04 to 0.12]	0.06 [0.03 to 0.11]	0.08 [0.03 to 0.14]	0.06 [0.02 to 0.11]	0.09 [0.04 to 0.17]	0.12 [0.07 to 0.21]	0.15 [0.08 to 0.24]	0.2 [0.1 to 0.33]
Precipitable Water (kg m ⁻²)	24.79 [23.06 to 26.82]	1.42 [0.7 to 2.26]	1.84 [1.03 to 2.62]	2.29 [1.6 to 3.09]	2.7 [1.92 to 3.92]	3.15 [2.13 to 4.38]	1.11 [0.28 to 2.13]	2.11 [0.98 to 3.15]	3.76 [2.41 to 5.08]	6.2 [4.24 to 8.83]	7.92 [5.21 to 10.69]

Fuente: IPCC (2021)

El IPCC (2021) también prevé variaciones en las precipitaciones intensas de un día con un periodo de retorno de 10 años para los escenarios de calentamiento global de 1,5 °C, 2 °C y 4 °C comparado al período preindustrial (FIG. 18).

Figura 18: Proyección de precipitaciones intensas para cada escenario de calentamiento futuros

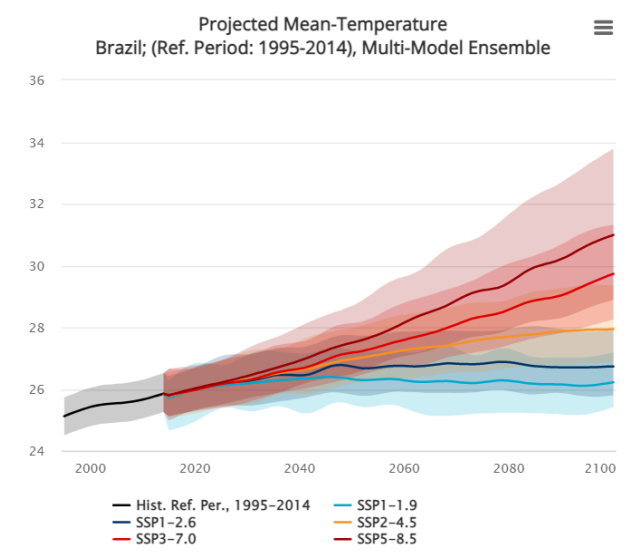


Fuente: IPCC (2021)

Adicionalmente, hay proyecciones realizadas con modelos a escala global, pero con resultados específicos para países y estados. El *Climate Change Knowledge Portal* (2023), desarrollado por el *World Bank Group*, proporciona una serie de proyecciones de parámetros climáticos para cada uno de los escenarios del SSP para el Brasil y específicos para los límites del estado de Minas Gerais. El portal ofrece resultados basados en modelos específicos o en un conjunto de ellos. En este trabajo se utilizará el enfoque multimodelo del portal que representan el rango y la distribución de los resultados previstos más plausibles del cambio en el sistema climático para un SSP seleccionado. Los datos de proyección climática proceden de las compilaciones de modelos climáticos mundiales del CMIP6, que apoya el Sexto Informe de Evaluación del IPCC y poseen una resolución de 100 km x 100 km.

La proyección de la temperatura media de Brasil a finales de este siglo para cada escenario SSP puede verse en el gráfico 7. Para Minas Gerais estos valores están en la tabla 3. En todas las combinaciones posibles se observa un aumento de la temperatura en ambas escalas regionales.

Gráfico 7: Evolución de la temperatura media prevista en Brasil para cada escenario



Fuente: *Climate Change Knowledge Portal* (2023)

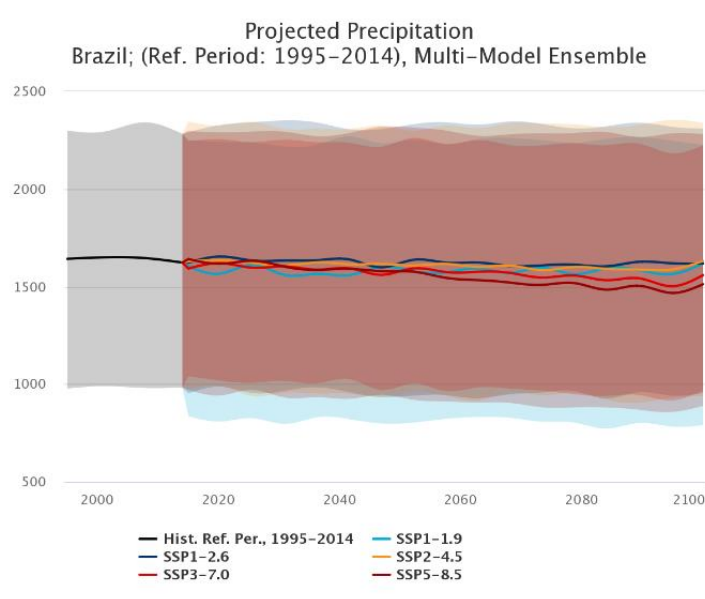
Tabla 3: Temperatura media prevista en Minas Gerais para cada escenario

	2020-2039	2040-2059	2060-2079	2080-2099
SSP1-1,9	0,69 °C	0,77 °C	0,75 °C	0,53 °C
SSP1-2,6	0,68 °C	1,12 °C	1,17 °C	1,14 °C
SSP2-4,5	0,79 °C	1,35 °C	1,84 °C	2,16 °C
SSP3-7,0	0,81 °C	1,59 °C	2,46 °C	3,44 °C
SSP5-8,5	0,93 °C	1,99 °C	3,29 °C	4,58 °C

Fuente: Climate Change Knowledge Portal (2023)

Las proyecciones de precipitaciones para Brasil de cada escenario hasta 2100 está en el gráfico 8, y para el estado de Minas Gerais en la tabla 4. Para Brasil, no existe un patrón único de aumento o disminución del volumen de precipitaciones, es decir, para cada escenario y para cada periodo de tiempo la previsión varía. Para Minas Gerais, en contrapartida, el patrón es de reducción del volumen anual de precipitaciones que, sin embargo, con un régimen torrencial de lluvias no tiene por qué disminuir el riesgo de inundaciones.

Gráfico 8: Evolución de la precipitación prevista en Brasil para cada escenario



Fuente: Climate Change Knowledge Portal (2023)

Tabla 4: Precipitación prevista en Minas Gerais para cada escenario

	2020-2039	2040-2059	2060-2079	2080-2099
SSP1-1,9	-81,69 mm	-69,09 mm	-39,34mm	-68,28 mm
SSP1-2,6	-38,74 mm	-84,29 mm	-71,40 mm	-69,99 mm
SSP2-4,5	-95,19 mm	-81,67 mm	-63,20 mm	-95,19 mm
SSP3-7,0	-129,37 mm	-107,89 mm	-103,89 mm	-122,21 mm
SSP5-8,5	-92,53 mm	-105,56 mm	-123,65 mm	-95,24 mm

Fuente: Climate Change Knowledge Portal (2023)

Como ya se ha mencionado, el aumento de la temperatura está muy correlacionado con los fenómenos de precipitaciones extremas, es decir, aunque las previsiones de volumen total de precipitaciones sean de disminución, esto no significa que su distribución vaya a ser uniforme desde el punto de vista espacial o temporal. Lo mismo ocurre con las previsiones de inundaciones, ya que son consecuencia directa de las fuertes precipitaciones, además de las características locales del territorio. En este contexto, la adopción de estrategias de adaptación en las cuencas urbanas y la simulación de sus impactos, objeto de este estudio, adquieren una gran relevancia.

2.4. Tendencias del cambio global con modelos de escala regional

Aunque el cambio climático sea un fenómeno de escala global, sus consecuencias son distintas para cada región y, por lo tanto, se utilizan también proyecciones de escalas menores para evaluación de impacto y definición de políticas públicas. En un contexto brasileño, según el PBMC (2014), las proyecciones de clima futuro proporcionan informaciones valiosas constituyéndose en herramientas útiles a la planificación estratégica y a la toma de decisiones para minimizar impactos potencialmente desastrosos en las actividades socioeconómicas y en el propio medio ambiente.

Brasil posee un vasto territorio con diferencias regionales relevantes de las cuales algunas son particularmente vulnerables a los eventos climáticos extremos. De esa manera, según PBMC (2014), la mejor herramienta científica para hacer proyecciones de cambios de factores ambientales es la *downscaling*, o regionalización, dinámica, o sea, un modelo regional que utiliza datos locales sin perder la coherencia con los modelos de escala global. Por tratarse de un modelo en alta resolución espacial, entre 25 a 50 km², al contrario de los modelos globales que simulan entre 100 a 200 km², consigue una representación más realista de los cambios en el territorio teniendo en cuenta las singularidades de cada región, tales como topografía, suelo, vegetación, proximidad al océano, entre otros. Tales elementos actúan como moduladores relevantes de las condiciones climáticas cuando asociados a las fuerzas de gran escala que son capturadas por los modelos globales.

Para el contexto de Minas Gerais, algunos autores han utilizados modelos regionales para simular los efectos locales con el “*Representative Concentration*

Pathways 8,5" (RPC 8,5), que sería el escenario más pesimista del conjunto anterior de escenarios difundidos por el IPCC en 2013, en el cual la temperatura podría calentarse hasta 8 °C relativo al periodo preindustrial. Comparando SSP5-8,5 con el RCP 8,5, cuando se usan con la misma configuración del modelo, SSP5-8,5 puede resultar en un poco más alto temperaturas que RCP8,5. Reboita *et al.* (2018), utilizó tres simulaciones con el *Regional Climate Model version 4* (RegCM4) considerando el período histórico entre 1980-2005 y el período futuro como 2070-2095. Para el período futuro, la temperatura del aire, en las tres proyecciones hechas, tuvo un aumento estadísticamente significativo de temperatura del aire, pudiendo llegar a un incremento de hasta 5 °C. Para la precipitación, el período histórico del documento indica que la frecuencia de eventos extremos lluviosos ha aumentado en la estación húmeda y disminuido en la estación seca. Esa tendencia positiva significativa en la frecuencia de los extremos también fue reforzada por Reis *et al.* (2018). Para el futuro, dos simulaciones indican aumento del volumen de precipitación durante el verano y uno durante la primavera, y para las demás estaciones, las proyecciones indican condiciones más secas que el período histórico. Finalmente, para los eventos extremos de precipitación, en ese estudio considerados como los eventos por encima del percentil 95%, la proyección futura es del aumento de lluvia en episodios extremos durante la estación lluviosa (tanto para el presente como para el futuro).

Natividade, Garcia y Torres (2016) utilizaron 19 Modelos de Circulación General pertenecientes al *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) para simular extremos climáticos de temperatura y precipitación en el período 1948-2005 y en los períodos de 2041-2070 y 2071-2100 para Minas Gerais. Los índices relacionados con la temperatura muestran claramente tendencias de aumento de los extremos de dicha variable, siendo la mayoría significativa y mostrando aumento de días y noches calientes y una reducción de días y noches frías en el estado de Minas Gerais (tanto para el presente como para el futuro). En el caso de los índices de precipitación, la tendencia no es clara y existen pocos valores significativos, sin embargo, se puede observar un aumento de las condiciones secas en la región norte del estado y de las condiciones húmedas en el sur de Minas Gerais, dónde está situada la ciudad de Belo Horizonte, intensificando las diferencias ya existentes en el estado.

Ballarin et al. (2023) desarrollaron un conjunto de datos diarios históricos (1980-2013) y futuros (2015-2100) para el Brasil, con corrección de sesgos y una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, que incluye seis variables meteorológicas importantes: precipitación (pr), temperaturas máxima (tasmax) y mínima (tasmin), radiación neta de onda corta en superficie (rss), velocidad del viento cerca de la superficie (sfcWind) y humedad relativa (hur). Se utilizó el método *Quantile Delta Mapping* para corregir los sesgos de las series temporales diarias, con el fin de corregir las incertidumbres derivadas del proceso de adaptación de los modelos globales a los regionales, es decir, las incertidumbres del proceso de *downscaling*.

El estudio se basa en un conjunto de 19 proyecciones de modelos climáticos CMIP6, a diferencia de los estudios anteriores mencionados, que se basaban en el quinto informe. Las proyecciones futuras contemplaban el escenario SSP2-4,5, considerado intermedio, y SSP5-8,5, considerado un escenario extremo. De este modo, las proyecciones muestran una amplia gama de cambios previstos en la dinámica climática mundial (BALLARIN et al., 2023).

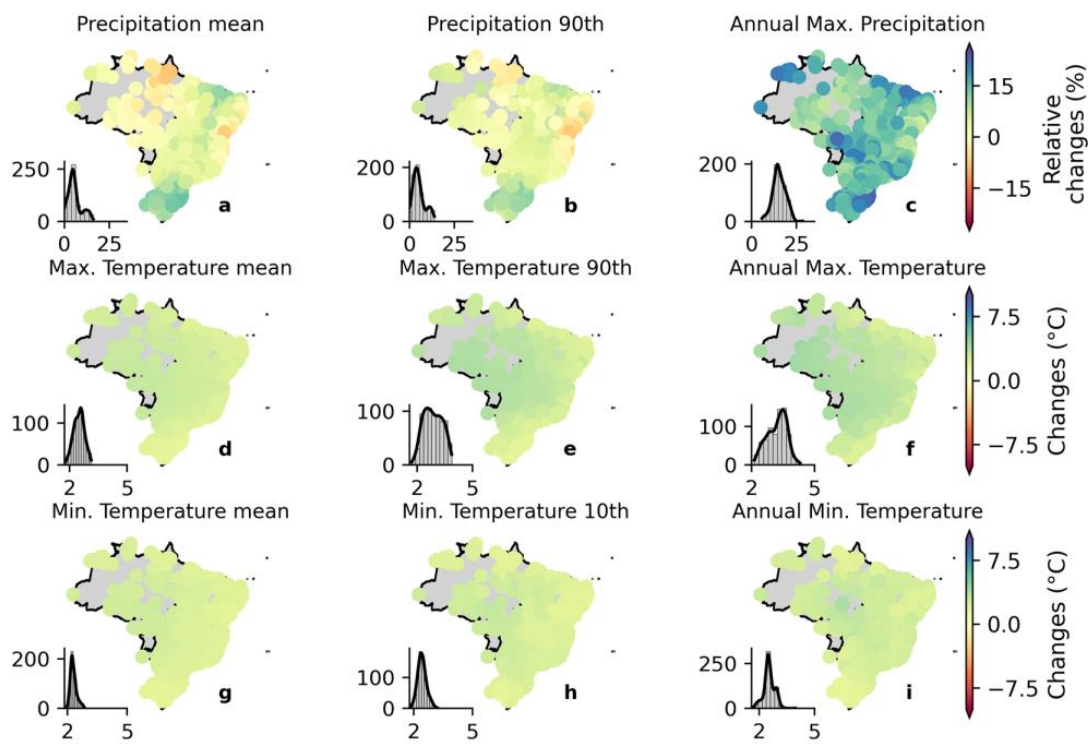
Según los autores, el desarrollo del conjunto de datos meteorológicos regionales en malla tiene como objetivo avanzar en los estudios hidroclimáticos en Brasil. Sin embargo, trabajar con variables climáticas en una cuadrícula no es una tarea trivial, ya que a menudo requiere un gran esfuerzo computacional. Por lo tanto, también redimensionaron los datos reticulares para que correspondieran a las 735 cuencas fluviales enumeradas en el *Catchments Attributes for Brazil (CABra)*. Como ya se ha mencionado en la metodología, los datos futuros proyectados por Ballarin et al. (2023) se utilizaron para las simulaciones hidrológicas desarrolladas en este estudio para la cuenca del Ribeirão Arrudas.

Como era de esperar, en el estudio de los autores los cambios simulados por el escenario SSP5-8,5 fueron mayores en magnitud que los simulados por SSP2-4,5. De las seis variables evaluadas, tasmax, tasmin, pr y sfcWind mostraron cambios significativos (>10%) entre las simulaciones históricas y futuras en la mayor parte del territorio brasileño, considerando ambos escenarios. Para hur y rss, los cambios proyectados fueron menores (<10%).

En general, se observó un aumento tanto de la tasmax como de la tasmin en ambos escenarios en Brasil, siendo el aumento previsto de la temperatura máxima a largo plazo ligeramente mayor en los biomas Amazonas, Pantanal y parte del Cerrado. Se observó una reducción de la temperatura media a largo plazo prevista en los biomas Amazonia, Caatinga y parte del Cerrado. En los biomas Pampa y Bosque Atlántico se prevé un ligero aumento. Este patrón de cambio es más evidente en el escenario SSP5-8,5. Con respecto a la precipitación máxima a largo plazo, se observó un aumento significativo (>10% para el escenario SSP2-4,5 y >20% para el escenario SSP5-8,5) en todo el país, incluso en los biomas donde se proyectó una reducción de la precipitación media.

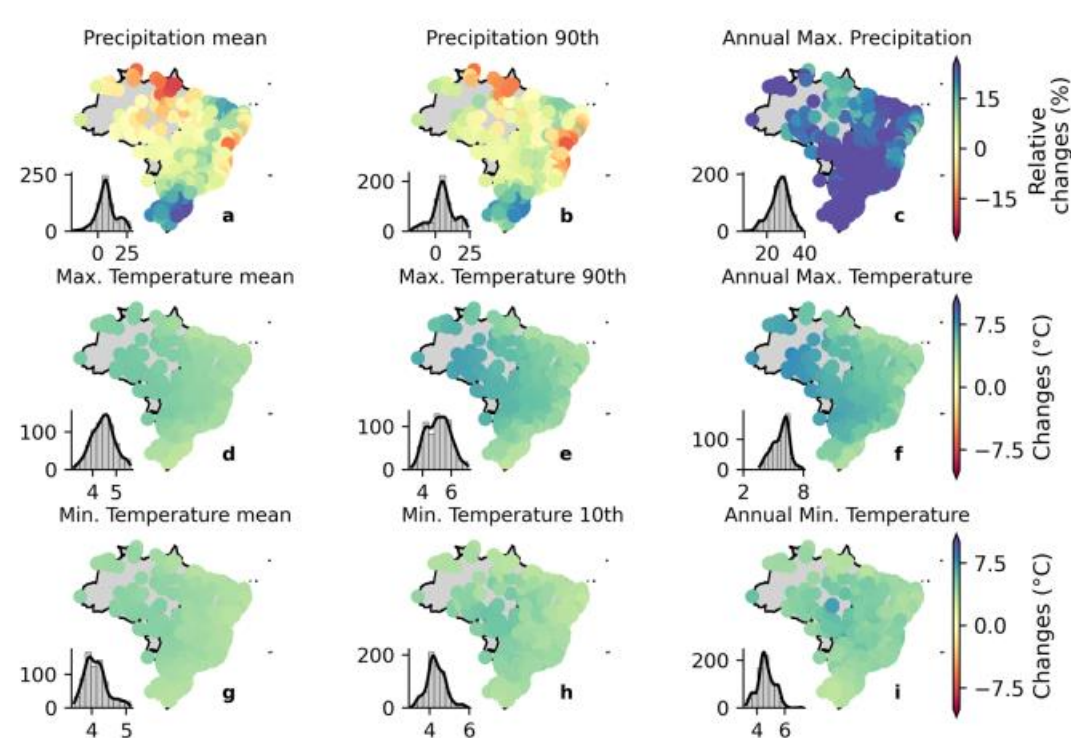
Las Figuras 19 y 20 muestran las tendencias de los resultados distribuidos espacialmente para el territorio brasileño para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, respectivamente. Los histogramas de cada panel indican la frecuencia de aparición de los cambios relativos.

Figura 19: Cambios relativos en los valores medios y extremos a largo plazo de las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, entre los periodos histórico (1980-2013) y futuro (2070-2100; SSP2-4,5)



Fuente: Ballarin et al. (2023)

Figura 20: Cambios relativos en los valores medios y extremos a largo plazo de las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, entre los periodos histórico (1980-2013) y futuro (2070-2100; SSP5-8,5)



Fuente: Ballarin et al. (2023)

En cualquier caso, según el PBMC (2014), la ocurrencia de eventos extremos registrados en Brasil en los últimos años, con todas sus gravísimas consecuencias sociales y ambientales, ilustra bien la necesidad de estrategias de adaptación para el país en los diversos sectores de actividades económicas. En este contexto, es necesario construir paisajes más resilientes, especialmente en las zonas urbanas.

3. Construcción de ciudades más resilientes ante las inundaciones

Considerando todos los desafíos y proyecciones futuras presentadas en un contexto global y regional, se hace necesario adaptar el territorio y, principalmente los medios urbanos, para que sean más resilientes al futuro. Las ciudades concentran más de la mitad de la población mundial y la tendencia es de incremento para los próximos años. A cada año las ciudades acogen a 67 millones de nuevos residentes, el 90% de los cuales se trasladan a ciudades de países en vías de desarrollo y para 2030, la expectativa es que casi el 60% de la población mundial viva en zonas urbanas. Esos factores hacen con que las ciudades y sus habitantes sean muy vulnerables a los fenómenos meteorológicos y eventos climáticos extremos (IPCC, 2021).

Según el IPCC (2014), la resiliencia en este contexto se interpreta a menudo como la capacidad sistémica para protegerse y reducir el impacto de determinadas amenazas mediante infraestructuras o de una gestión del uso del suelo sensible al clima. Cuando se considera una ciudad concreta, el nivel y las formas de resiliencia suelen estar relacionados con factores, servicios e instituciones locales específicos como, por ejemplo, la capacidad de la superficie de una ciudad para gestionar con los desagües pluviales de las lluvias torrenciales, o la infraestructura disponible para la población de alto riesgo en situaciones de estrés térmico durante los días calurosos. En este caso, la resiliencia no es sólo la capacidad de recuperarse del impacto, sino también la capacidad de evitar o minimizar la necesidad de recuperarse y la capacidad de soportar cambios inesperados o imprevistos (UNISDR, 2011).

Además, según IPCC (2014), para los centros urbanos, la resiliencia puede considerarse también en relación a los individuos/hogares y las comunidades, y para todos los ámbitos, pueden considerarse dos tipos de adaptación: proactiva y reactiva. La primera consiste en acciones que evitan o reduzcan el impacto del cambio climático, por ejemplo, teniendo infraestructuras que reduzcan los riesgos. Ya la segunda, la adaptación reactiva, hace frente al impacto de un evento para regresar al estado anterior (SHAW; THEOBALD, 2011). Para los centros urbanos, "recuperarse" incluye la capacidad del gobierno para restablecer rápidamente los servicios clave y reparar las infraestructuras. Idealmente, para la adaptación al cambio climático, las respuestas de las poblaciones urbanas, las empresas y los gobiernos deberían permitir "regresar hacia adelante" a un estado más resiliente.

En el contexto del cambio climático y la resiliencia urbana, y para el enfoque de este estudio, cabe diferenciar dos conceptos: mitigación y adaptación. Según IPCC (2001), la mitigación es una intervención antropogénica para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero. Ya la adaptación, un ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o previstos o a sus efectos, que modera los daños o aprovecha oportunidades.

La adaptación y la mitigación son estrategias complementarias para reducir y gestionar los riesgos del cambio climático. Una reducción sustancial de las emisiones en las próximas décadas puede reducir los riesgos climáticos en el siglo XXI y más allá,

augmentar las perspectivas de una adaptación eficaz, reducir los costes y los retos de la mitigación a largo plazo y contribuir a vías de desarrollo sostenible resistentes al clima (IPCC, 2015). En cualquier caso, conviene destacar que, aunque los esfuerzos de mitigación son positivos, los beneficios de estas acciones pueden tardar mucho tiempo en generar cambios, por lo que las estrategias de adaptación deben desarrollarse mucho antes que se noten los resultados de las medidas de mitigación (ACT, 2018 *apud* MERTZ *et al.*, 2009). De este modo, según Yohe (2000), la necesidad de adaptación es inevitable, independientemente de la eficacia con que consigamos reducir el crecimiento de las emisiones, porque la inercia del sistema climático provocará el cambio climático y los consiguientes impactos en los sistemas naturales y gestionados (MERTZ *et al.*, 2009).

Este estudio se centrará en algunas estrategias urbanas de adaptación.

3.1. Adaptación como instrumento frente a los retos del cambio climático

A lo largo de la historia, los seres humanos y los sistemas socioecológicos han cambiado en respuesta a las diversas presiones externas existentes. Sin embargo, el cambio climático es ligeramente diferente en el sentido de que existe cierta incertidumbre en cuanto a su impacto, así como en el hecho de que al mismo tiempo que los seres humanos sufren la mayor parte de sus efectos, también están contribuyendo a él. Por estas razones, comprender la profundidad de esta cuestión hace que la adaptación al cambio climático sea uno de los retos más crítico de la actualidad (PELLING, 2011).

Según Kates (2000), el concepto de adaptación no recibió mucha atención en los primeros años de los estudios internacionales sobre el cambio climático, ya que el mundo académico se centró principalmente en la investigación de los impactos de las alteraciones climáticas y en las estrategias de mitigación. Sin embargo, con el paso de los años el concepto de adaptación se ha abordado de forma más exhaustiva, desde una perspectiva que considera tanto la capacidad como la habilidad para actuar ante el cambio. De acuerdo con Mertz *et al.* (2009), la adaptación al cambio climático está recibiendo cada vez más atención internacional, también por el aumento de la confianza en las proyecciones sobre el cambio climático.

En este contexto, surgen diversas estrategias de adaptación que, en general, pretenden mantener los medios de subsistencia y la calidad de vida de la población. Los ejemplos de estrategias de adaptación son diversos. Según EPA (2018) *apud* Zolnikov (2019), pueden incluir el desarrollo del entorno construido en función de la subida del nivel del mar, la ampliación de la planificación y el uso del suelo para incorporar las predicciones climáticas, la protección de las zonas biogeoquímicas y los hábitats críticos que pueden estar más expuestos al cambio climático, la conexión de paisajes con corredores ecológicos para permitir la migración, la reproducción de zonas de hábitats seguros, la prevención o disminución de la extracción de aguas subterráneas de acuíferos poco profundos, la gestión de la demanda de agua, la fortificación de diques, etc. Además, como planteado en este estudio, las SbN, de manera general, son fuertes protagonistas de las estrategias de adaptación.

No obstante, conviene resaltar que las estrategias no deben abordarse únicamente desde una perspectiva tecnológica. Para Zolnikov (2019), la capacidad de adaptación está vinculada al desarrollo social y económico (por ejemplo, factores económicos naturales y artificiales, capital humano y social, gobernanza, renta nacional, salud, competencias tecnológicas), así como el contexto medioambiental, y algunas regiones del mundo pueden no estar suficientemente equipadas y, por tanto, no ser capaces de mitigar el cambio o adaptarse a él. De esa manera, cabe señalar que estas estrategias deben adaptarse al entorno específico afectado, ya que los impactos varían en función de cada contexto local (MARSHALL *et al.*, 2010). En función de cómo se planifiquen, dónde se implanten y cómo se mantengan, las SbN pueden aliviar o agravar las desigualdades socioeconómicas existentes en el territorio (HAASE, 2017).

De acuerdo con Mertz *et al.* (2019), los países en desarrollo, clasificación que puede englobar a Brasil según algunos aspectos, experimentarán los efectos del cambio climático de forma diferente, no sólo por las diferencias en el cambio previsto de los parámetros climáticos, sino también porque las vulnerabilidades y las capacidades de adaptación varían mucho entre naciones y regiones y, por tanto, deben tenerse en cuenta las particularidades territoriales a la hora de definir cualquier estrategia de adaptación. Además, debido al mayor grado de vulnerabilidad de estos países, ellos asumirán gran parte de los costes globales del cambio climático, aunque el aumento de

las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero es principalmente responsabilidad de los países industrializados.

Siguiendo esta línea de pensamiento, las políticas de adaptación al cambio climático deben concebirse con mucho cuidado, ya que se encuentran en una realidad compleja de sociedades vulnerables por diversos motivos. De este modo, se puede reducir la vulnerabilidad de la población de esas comunidades y, en un mundo ideal, podrá formarse un "buen círculo" de vulnerabilidad reducida, capacidad de adaptación aumentada y adaptación adecuada (MERTZ *et al.*, 2019).

También es importante considerar hasta qué punto las políticas deben ser proactivas o reactivas, o incluso ambos. La elección entre una y otra debe depender de la confianza que se tenga en las predicciones climáticas locales, ya que las inversiones en adaptación al cambio previsto podrían ser inútiles o incluso contraproducentes si las predicciones resultan erróneas. Esto es especialmente crucial en los países en desarrollo, donde la capacidad de inversión y las posteriores medidas correctoras de los errores son limitadas. Mientras existan grandes incertidumbres sobre la permanencia de los efectos climáticos observados a corto plazo, se recomienda introducir primero estrategias de desarrollo más resistentes al clima y estrategias sólidas de gestión de riesgos que apoyen tanto los objetivos generales de desarrollo como la adaptación al cambio climático. Dependiendo del país en cuestión, también es importante centrarse en los beneficios colaterales y los riesgos de las medidas de adaptación, especialmente de las inversiones a largo plazo. Esto implica que la selección de las medidas de adaptación debe evaluarse en el contexto de un programa más amplio que el del cambio climático (MERTZ *et al.*, 2019).

Este estudio no evaluará los aspectos socioeconómicos relacionados con la implantación de SbN, sino que mostrará de forma generalizada algunas opciones existentes que actúan como estrategias de adaptación para reducir los riesgos de inundación y sus beneficios, así como simular su impacto potencial en la cuenca del Ribeirão Arrudas desde el punto de vista de la efectividad en la reducción de los caudales máximos. Se recomienda que, para una aplicación eficaz de tales soluciones en el territorio, se analicen más detenidamente los aspectos socioeconómicos dentro del contexto local.

3.2. SbN como tendencias de transformación urbana para adaptación climática

Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) es un término que describe las intervenciones que benefician tanto la biodiversidad como el bienestar humano. Las SbN incluyen una amplia gama de acciones que aprovechan el poder de la naturaleza para fomentar el desarrollo sostenible, apoyando la resiliencia climática, la salud de las poblaciones, las economías sostenibles, los empleos verdes y la conservación de la biodiversidad (UNEP, 2021). Su definición más utilizada es la de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), que define las SbN como "acciones para proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados que abordan los retos sociales de forma eficaz y adaptativa, proporcionando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad". Funcionan como un "concepto paraguas" que engloba varios otros términos, como infraestructura verde y azul, que ya se han mencionado en este estudio.

Además, la IUC ha definido una serie de principios relativos a las SbN que deben utilizarse junto con su definición. Las SbN:

1. Adoptan normas (y principios) de conservación de la naturaleza;
2. Pueden aplicarse solas o de forma integrada con otras soluciones a los retos sociales (por ejemplo, soluciones tecnológicas y de ingeniería);
3. Están determinadas por contextos naturales y culturales específicos que incluyen conocimientos tradicionales, locales y científicos;
4. Producen beneficios sociales de forma justa y equitativos, de forma que se promueva la transparencia y una amplia participación;
5. Mantienen la diversidad biológica y cultural y la capacidad de los ecosistemas para evolucionar a lo largo del tiempo;
6. Se aplican a escala de paisaje;
7. Reconocen y abordan las contrapartidas entre la producción de unos pocos beneficios económicos inmediatos frente al desarrollo futuro de servicios ecosistémicos;
8. Forman parte integral del diseño general.

Para la UNEP (2021) las SbN se hacen relevante para los medios urbanos a diferentes escalas. Dentro de las ciudades pueden proporcionar sombra natural y reducir los efectos de la isla de calor urbana naturales y las necesidades de refrigeración, gestionar el agua de escorrentía, mejorar la salud y el bienestar reduciendo la contaminación atmosférica y ofreciendo espacios recreativos. Alrededor de las ciudades pueden formar parte de interrelaciones ciudad-región relacionadas con la gestión de cuencas hidrográficas, espacios recreativos, gestión de incendios forestales y captura de CO₂.

La biodiversidad presente en las SbN es fundamental para mantener el funcionamiento de los ecosistemas y la diversidad de especies, favoreciendo así la redundancia ecológica y la resiliencia frente al cambio global (UNEP, 2021). Las SbN apoyan una economía circular, que es restaurativa y regenerativa por su propia esencia (WWAP, 2018).

De acuerdo con UNEP (2021), cuando se aplican bien, las SbN no sólo ofrecen resiliencia y garantías de servicios sociales y medioambientales esenciales, sino también beneficios económicos y crecimiento a largo plazo. Sin embargo, cuando se aplica únicamente como experimentos urbanos individuales, probablemente no se aprovecha todo el potencial de las SbN para abordar complejos retos medioambientales y sociales. Y para que las SbN se implante a gran escala, existen cuatro barreras principales que siguen dificultando la difusión de su uso relacionadas con la percepción, la política, el tiempo y la financiación.

La primera barrera es la percepción entre el entorno político de que la naturaleza es demasiado lenta y no forma parte real de la solución. La segunda barrera es más técnica, en el sentido de que la innovación a través de las SbN puede verse bloqueada debido a normativas rígidas o anticuadas, en criterios de construcción o directrices de planificación. La tercera barrera está relacionada con el tiempo. Existe una desconexión entre el carácter generalmente de corto plazo de las iniciativas municipales y las inversiones a largo plazo que requieren las SbN. Finalmente, la cuarta barrera está relacionada con la financiación necesaria para aplicarlas a gran escala, ya que a menudo se consideran gastos en lugar de inversiones, que aportan múltiples beneficios a las

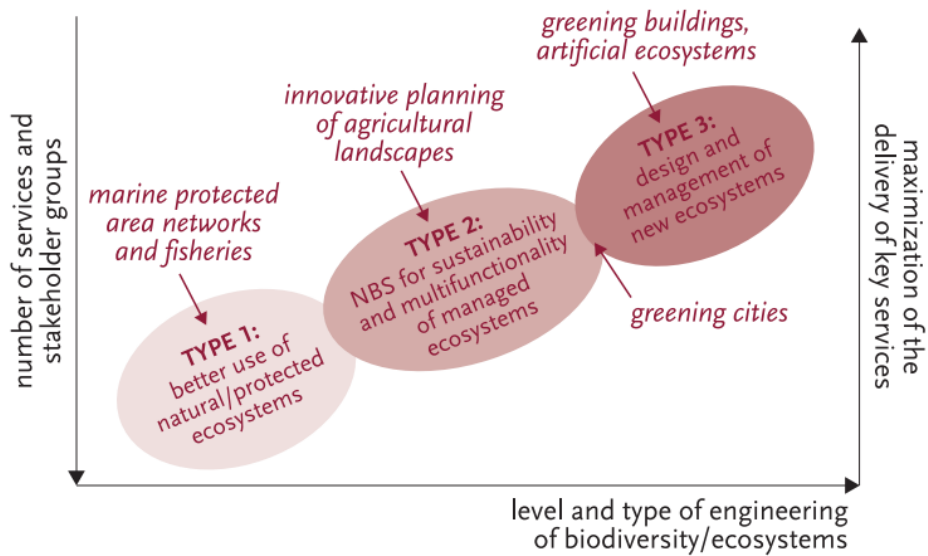
ciudades. Y por eso son fácilmente descartados en los presupuestos municipales o regionales (UNEP, 2021).

Los desafíos a la difusión son diversos, pero hay algunas prácticas que ayudan a reducir las barreras. Una de ellas es categorizar, ya que el tema de las SbN es extremadamente amplio. Según Eggermont *et al.* (2015), las SbN pueden clasificarse en tres tipos en función de dos criterios distintos: (i) el nivel necesario de ingeniería de la biodiversidad y de los ecosistemas involucrados en las SbN; y (ii) el nivel de mejora de los servicios ecosistémicos que puede lograrse mediante las SbN, que suele ser inversamente proporcional al número de servicios y grupos de interesados a los que se dirige una solución específica. Esto conduce a los siguientes tipos:

- **Tipo 1:** soluciones que implican hacer un mejor uso de los ecosistemas naturales o protegidos existentes a través de la no intervención o intervención mínima. Este tipo de SNB está relacionado, por ejemplo, con el concepto de reservas de la biosfera, que incorporan zonas protegidas centrales para la conservación de la naturaleza y zonas de amortiguación y transición donde la gente vive y trabaja de forma sostenible.
- **Tipo 2:** soluciones que hacen parte de un enfoque de gestión que desarrollan ecosistemas y paisajes sostenibles y multifuncionales, lo que mejora la obtención de servicios ecosistémicos en comparación con lo que se obtendría con una intervención más convencional; y
- **Tipo 3:** soluciones que implican la gestión intrusiva o incluso la creación de nuevos ecosistemas. Este tipo está relacionado con infraestructuras verdes y azules, y también a restauración de zonas muy degradadas.

Al categorizarlo, resulta más fácil acercar el tema a los responsables por la toma de decisiones. A continuación, una figura que representa las tipologías planteadas (FIG. 21).

Figura 21: Representación esquemática de la variedad de tipos de SbN



Fuente: Eggermont et al. (2015)

Las SbN, como ya se ha dicho, pueden utilizarse para diversos fines, pero dado que este trabajo se centra en la adaptación a las inundaciones, es pertinente profundizar un poco más en la relación entre estas soluciones y el territorio en términos de recursos hídricos. Al trabajar junto con la naturaleza, estas soluciones ofrecen medios esenciales, que van más allá de los enfoques tradicionales, para aumentar la eficiencia social, económica e hidrológica con respecto a la gestión del agua (WWAP, 2018).

La aplicación de las SbN mediante el aprovechamiento de los servicios relacionados con el agua de las "infraestructuras naturales", como los bosques, los humedales y las llanuras aluviales, ayuda a combatir el riesgo de crisis hídrica, en particular ante las futuras tensiones climáticas. Además, actúan, por ejemplo, en la gestión del riesgo de inundaciones. Mientras que las infraestructuras tradicionales "grises" de control de inundaciones, como diques y presas, suelen degradar el hábitat acuático al alterar el régimen de flujo natural del río y separarlos de sus llanuras de inundación, preservar sus llanuras de inundación y/o reconectarlas con los ríos puede, en cambio, aportar beneficios a la gestión de inundaciones y conservar al mismo tiempo los valores y funciones de los ecosistemas (OZMENT; DIFRANCESCO; GARTNER, 2015; OPPERMAN et al., 2009).

Sin embargo, en la mayoría de los casos, la infraestructura verde y la infraestructura gris pueden y deben trabajar juntas para maximizar su efecto. Según el

UNEP (2021), algunos de los mejores ejemplos de uso de las SbN se dan cuando son capaces de mejorar el rendimiento de las infraestructuras grises. En un escenario en el que hay infraestructuras grises envejecidas, inadecuadas o insuficientes en todo el mundo, las SbN surgen como soluciones innovadoras que incluyen perspectivas de servicios ecosistémicos, mayor resiliencia y consideraciones relativas a los medios de subsistencia en el marco de la planificación y la gestión del agua. Las SbN ayudan a abordar simultáneamente los problemas de cantidad, calidad y riesgo relacionados con el agua, además de contribuir al desarrollo de la resiliencia general del sistema.

Para Brown, Keath y Wong (2009), la transición del sistema tradicional de gestión del agua urbana a la gestión de las inundaciones urbanas basada en la naturaleza tiene como objetivo restablecer las condiciones hidrológicas previas a la urbanización, es decir, reducir y desacelerar la escorrentía mediante la incorporación de elementos verdes que aumenten la infiltración, la evaporación y retengan el agua. Cada vez son más las ciudades de todo el mundo que han implantado soluciones, normativas, programas e incentivos verdes que permiten la protección frente a las inundaciones basada en las SbN. Aun así, a pesar del rápido crecimiento de las inversiones en SbN, los datos indican que siguen representando menos del 1% de la inversión total en infraestructuras de gestión del agua (UNEP, 2021).

De toda manera, es importante considerar la interconectividad de los espacios verdes urbanos a escala local, regional o incluso nacional para reducir los riesgos de inundación de manera más eficaz en todo el territorio. La conectividad se refiere tanto a la conexión física espacial entre elementos como a la conexión entre procesos naturales y ecológicos, como los ciclos del agua y biogeoquímicos, la conectividad funcional (MUKHERJEE; TAKARA, 2018). De esta manera, incluso si una solución aislada pierde al menos parcialmente su funcionalidad durante un evento de lluvia, una red conectada más grande de SbN puede funcionar como una infraestructura descentralizada de gestión de aguas pluviales y reducir los riesgos de inundación (WWPA, 2018). Para A Zuniga-Teran *et al.* (2020), este enfoque descentralizado conlleva que las SbN sean, por lo general, intrínsecamente más resilientes que las grandes infraestructuras grises centralizadas.

A continuación, se exponen algunas de las principales SbN que pueden utilizarse como medidas de adaptación frente al cambio climático en lo que se refiere a las inundaciones.

3.2.1. Cubiertas Verdes

De acuerdo con Woods-Ballard *et al.* (2007), las cubiertas verdes son sistemas en niveles que, a través de una superficie con vegetación, permiten la infiltración, el drenaje y el almacenamiento del agua de lluvia en superficies anteriormente impermeables y, por tanto, tienen el potencial de reducir la escorrentía superficial y los caudales punta. Además, tienen también las siguientes ventajas: buena capacidad para eliminar los contaminantes urbanos depositados en la atmósfera y, en consecuencia, mejorar la calidad del aire; pueden aplicarse en urbanizaciones de alta densidad; pueden tener beneficios ecológicos, estéticos y de comodidad; no es necesario ocupar más terreno; aumentan la humedad del aire en las zonas urbanas; aíslan los edificios de temperaturas extremas y ejercen cierto nivel de absorción acústica.

Según Woods-Ballard *et al.* (2007), se pueden clasificar las cubiertas verdes en tres tipos principales. El primero son las cubiertas verdes extensivas, que cubren toda la superficie del tejado con plantas de bajo crecimiento y escaso mantenimiento, con la intención de que sean autosuficientes. Suelen estar formadas por un medio de cultivo de entre 25 mm y 125 mm de espesura, en el que se cultiva una variedad de plantas resistentes como musgos, suculentas, hierbas o gramíneas. Son ligeras y económicas y pueden utilizarse en una gran variedad de lugares con un mantenimiento mínimo. El segundo tipo son las cubiertas verdes intensivas, que son entornos ajardinados con grandes ventajas de comodidad que incluyen jardineras o árboles, y suelen ser más asequibles. También pueden incluir masas de agua y almacenar agua de lluvia para el riego. Debido a su mayor complejidad, suelen imponer cargas mucho mayores a la estructura del edificio y requieren un mantenimiento continuo significativo. Por último, el tercer tipo son las cubiertas verdes intensivas sencillas que están vegetadas con hierba o plantas tapizantes. Requieren un mantenimiento regular, incluido el riego, el abono y la corte del césped. Sin embargo, las cargas sobre las estructuras de los edificios son moderadas, lo que abarata la estructura de soporte. Pueden ser accesibles, aunque la mayoría de las veces se diseñan para que no se vean. También hay varias

combinaciones de cubiertas verdes que combinan más de un tipo en un único sistema de cubierta. Las especies vegetales deben elegirse siempre en función de las condiciones ambientales del lugar y, aunque requieren una mayor inversión inicial que los sistemas convencionales, las cubiertas verdes aportan más beneficios a largo plazo (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007). A continuación, un ejemplo de cubierta verde (FIG. 22).

Figura 22: Cubierta verde en el edificio del Banco do Brasil en Belo Horizonte



Fuente: Rocha (2011) apud Rosa (2017)

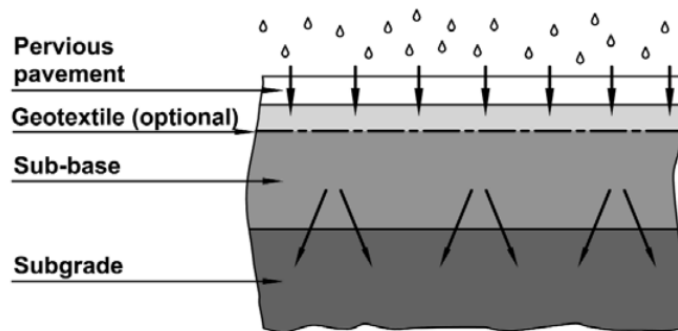
3.2.2. Pavimentos Permeables

Los pavimentos permeables son alternativas al pavimento convencional que, al mismo tiempo que proporcionan condiciones adecuadas para el tráfico de peatones y/o vehículos, permiten, debido a su porosidad/espaciamiento, que el agua de lluvia se infiltre en la superficie y en las capas subyacentes. Así, las aguas pluviales se almacenan temporalmente antes de ser infiltradas en el suelo, reutilizadas, vertidas en un curso de agua u otro sistema de drenaje. Entre sus principales ventajas destacan: la reducción significativa del volumen y la tasa de escorrentía superficial; la eficacia en la eliminación de contaminantes del agua de lluvia; la viabilidad en zonas de alta densidad; el bajo mantenimiento; y la buena aceptación por parte de la comunidad (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007). También pueden dividirse en tres tipos según los autores.

En el tipo A, toda la lluvia pasa a través de la subestructura, donde puede almacenarse temporalmente, hasta el subsuelo. Normalmente, no genera vertido, pero puede ser necesario un rebosadero de emergencia para eventos que superen los

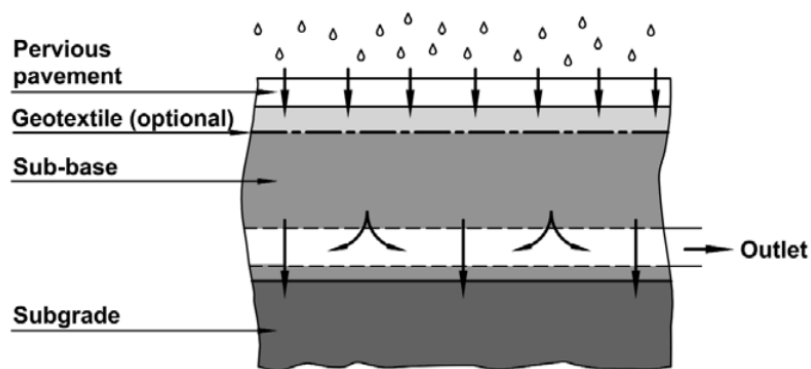
previstos o en caso de colmatación del sistema. En el tipo B, la estructura contiene una serie de tubos perforados que drenan la proporción de lluvia que supera la capacidad de infiltración del subsuelo. Por último, en un sistema de tipo C no hay infiltración en el subsuelo. Una vez que el agua ha percolado a través de la *sub-base*, se drena fuera del sistema y, para que esto sea posible, el sistema suele estar rodeado por una membrana flexible y permeable colocada por encima de la *sub-base*. Esta técnica se utiliza generalmente en lugares donde los suelos no son muy permeables o resistentes, cuando es necesario recoger el agua para reutilizarla, cuando el nivel freático está a menos de 1 m de la *sub-base* y/o sus aguas necesitan protección. Los esquemas de cada tipo se muestran en las figuras 23, 24 y 25 respectivamente.

Figura 23: Pavimento permeable de tipo A: infiltración total



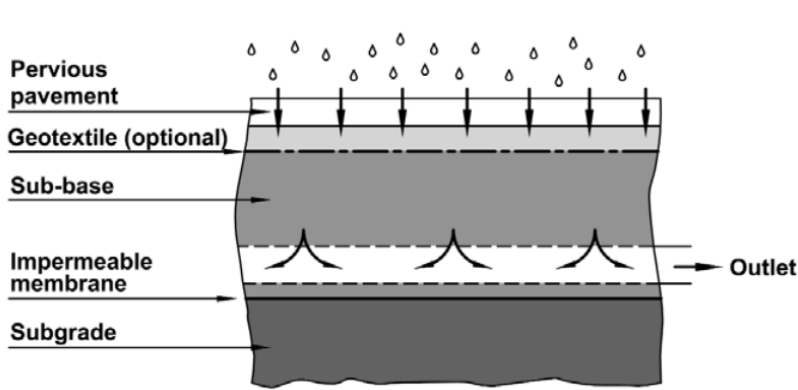
Fuente: Woods-Ballard et al. (2007)

Figura 24: Pavimento permeable de tipo B: infiltración parcial



Fuente: Woods-Ballard et al. (2007)

Figura 25: Pavimento permeable de tipo C: sin infiltración



Fuente: Woods-Ballard et al. (2007)

Los pavimentos permeables pueden ser de grava, hormigón o malla de plástico, bloques de hormigón diseñados para este fin o asfalto poroso (SUD WALES, 2023). Los criterios de implantación de estos sistemas deben variar en función de las características de relieve y tráfico del lugar donde se vaya a realizar la pavimentación (ROSA, 2017).

3.2.3. Humedales Artificiales, o Wetlands

Los humedales artificiales son sistemas que proporcionan tanto atenuación de la escorrentía superficial como tratamiento del agua de lluvia por actuar como un biofiltro. Suelen ser estanques poco profundos y zonas pantanosas, cubiertos casi en su totalidad por vegetación acuática, que retienen la escorrentía durante un periodo suficiente para permitir que los sedimentos se asienten y los contaminantes sean eliminados, facilitando la adhesión a la vegetación y la descomposición aeróbica. Sus principales ventajas son: buena capacidad para eliminar los contaminantes urbanos; si se recubre, pueden utilizarse donde las aguas subterráneas son vulnerables; buena aceptabilidad por parte de la comunidad; posibles beneficios ecológicos (creación de hábitats), estéticos y de comodidad; y potencial para añadir valor a la propiedad local (WOODS-BALLARD et al., 2007). El diseño de cada humedal varía según la profundidad de la cobertura de agua, el almacenamiento y la función que se pretenda que cumpla la estructura. Para el SUD Gales (2023), sólo deben utilizarse humedales especialmente contruidos para el tratamiento de las aguas superficiales, y se recomiendan debido a la posibilidad de sobrecargar el sistema con un exceso de sedimentos. A continuación, un ejemplo de humedal artificial (FIG. 26).

Figura 26: Una sección de los humedales de Haikou, China



Fuente: Vylde (2022)
Fotografía: Kongjian Yu

3.2.4. Trincheras de Inundación

Según Baptista *et al.* (2011) *apud* Rosa (2017), las trincheras de infiltración son estructuras lineales que pueden ser instaladas en la superficie o bajo el suelo, con pequeñas profundidades, que funcionan como depósitos que almacenan el agua precipitada y facilitan su infiltración en el suelo. Están formadas por zanjas que realizan la función de filtro, ya que se rellenan con material granular y se envuelven en una capa de material impermeable, que impide o dificulta su colmatación, garantizando una reducción del caudal punta por la infiltración desde el fondo o por las laterales de la estructura. Las trincheras de infiltración pueden clasificarse en dos grupos: trincheras superficiales y trincheras subterráneas. Las de superficie suelen utilizarse en zonas residenciales, ya que la carga de sedimentos y aceites es menor, lo que permite que sean retenidos por el césped. Los sistemas subterráneos, en cambio, pueden recibir escorrentías más concentradas procedentes de tuberías o estructuras de drenaje, pero deben estar equipados con estructuras de entrada capaces de retener sedimentos y aceites (SCHUELER, 1987). Entre las principales ventajas de estos sistemas se encuentran: una reducción significativa de las tasas y volúmenes de escorrentía; reducción significativa de la carga de contaminantes vertidos en el cuerpo receptor; y facilidad de incorporación en el paisaje del lugar, por ejemplo, junto a las carreteras (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007). A continuación, un ejemplo de trinchera de infiltración (FIG. 27).

Figura 27: Trinchera de infiltración adoptada en el jardín



Fuente: SUD Gales (2023)

3.2.5. Celdas de Biorretención, o Jardines de Lluvia

Las zonas de biorretención, o jardines de lluvia como se les llama comúnmente, son depresiones poco profundas integradas en el paisaje local de zonas muy impermeables que se basan en suelos artificiales, vegetación específica y filtración para eliminar la contaminación y reducir la escorrentía superficial. La escorrentía filtrada se recoge y se devuelve al sistema de drenaje o, si las condiciones del lugar lo permiten, se exfiltra al suelo circundante. Parte del volumen de escorrentía también se pierde por evaporación y transpiración de las plantas. Al igual que los otros ejemplos ya presentados, los jardines de lluvia también requieren rutas de flujo adecuadas o desbordamientos para transportar el agua, que excede los volúmenes diseñados, de forma segura a los sistemas de drenaje receptores apropiados. Entre sus principales ventajas destacan: la posibilidad de ser planificadas como paisaje con su trazado flexible; gran eficacia en la eliminación de contaminantes urbanos; reducción del volumen y la tasa de escorrentía; funcionalidad en zonas altamente impermeables; y buena adaptabilidad (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007). A continuación, un ejemplo de jardín de lluvia (FIG. 28).

Figura 28: Ejemplo de un jardín de lluvia implantado en una zona urbana



Fuente Earthwatch (2023)

3.3. Aplicaciones de las SbN por el mundo

Las SbN son formas innovadoras de tratar el entorno urbano, restableciendo el equilibrio con el territorio en el que se ubica. Así, en diversos lugares del mundo, se ha implantado y medido el rendimiento de estas soluciones tanto para el control de las inundaciones como para mitigar los efectos del aumento de las temperaturas en los centros urbanos. A continuación, se presentan algunos casos reales de aplicación que dialogan con la propuesta desarrollada en este estudio.

3.3.1. China

Tras décadas de rápida urbanización, sobreexplotación de los recursos e intensa contaminación, muchas zonas urbanas de China se enfrentan a una grave escasez de agua, intercalada con inundaciones periódicas agravadas por la crisis climática. Entre 2007 y 2016, los problemas relacionados con el agua provocaron pérdidas estimadas en más de 36.000 millones de dólares al año. En este contexto, en 2014 el Gobierno chino introdujo la idea de las "ciudades esponja" para hacer frente a las inundaciones urbanas aumentando la permeabilidad del agua de lluvia en las ciudades vulnerables. Las ciudades esponjas son un enfoque urbano específico del contexto para la gestión integrada del agua que utiliza infraestructuras gris-verdes como canales y vías verdes, cubiertas verdes, diseño poroso y enfoques de ahorro de agua para controlar las inundaciones urbanas, limitar la contaminación del agua, reciclar el agua de lluvia y restaurar los entornos degradados (GILL, 2021). En las 30 ciudades elegidas como piloto,

el objetivo fue retener la mayor cantidad de agua posible durante las estaciones lluviosas, limitando la erosión y ralentizando la velocidad de la escorrentía para que sea absorbida por los suelos circundantes y los sistemas de drenaje, además de estar disponible para cubrir las necesidades cuando haya sequías (LI *et al.*, 2017). Aunque la iniciativa resulta muy prometedora para integrar las SbN en el diseño urbano, el análisis de su fase piloto también señaló varias lecciones importantes. En primer lugar, las diferentes políticas de agua y uso del suelo y los derechos de propiedad complicaron la regulación y la aplicación. En segundo lugar, la falta de normas exhaustivas y directrices nacionales hizo que algunas de las infraestructuras verdes de bajo impacto esenciales que necesitaban las ciudades esponja no estuvieran fácilmente disponibles para su uso. En algunas zonas, por ejemplo, las bajas temperaturas invernales pueden acabar con algunas de las infraestructuras verdes más eficaces, como las protecciones vegetales. Por último, la financiación de la iniciativa resultó difícil. El gobierno central cubrió entre el 15% y el 20% de los costes totales, pero las ciudades variaron en su capacidad de aprovechar las asociaciones público-privadas para cubrir las cantidades restantes (CHEN; CHEN, 2020). A continuación, un diseño gráfico de lo que sería una ciudad esponja (FIG. 29).

Figura 29: Diseño gráfico de una ciudad esponja



Fuente: Gill (2021)

3.3.2. Corea del Sur

Según ADB (2016), desde 1960, el gobierno coreano ha adoptado diversas medidas y políticas nacionales de gestión del agua destinadas a proteger el medio

ambiente y controlar las inundaciones. Un caso en Seúl, emblemático a nivel internacional por su magnitud y los muchos beneficios que aporta al tejido urbano, es el del río Cheonggyecheon. El proyecto actuó en diversos temas como la estabilización de taludes, la gestión del agua - incluyendo inundaciones -, de la energía, del calor y de los gases de efecto invernadero; todo ello relacionado a la descanalización y restauración del río que cruza la ciudad de este a oeste y que antes estaba cubierto por una gran autopista. El proyecto, abierto a la población en 2005, creó oportunidades ecológicas y recreativas a lo largo de un corredor de 5,8 kilómetros en el centro de Seúl. Además de los beneficios medioambientales, el proyecto también estimuló el crecimiento económico y el desarrollo en una zona de la ciudad que había decaído. El proyecto incorporó la anchura original del arroyo, pero se rebajó el lecho para permitir futuras inundaciones, manteniéndose en la parte visible una profundidad media de 40 centímetros y una velocidad media de la corriente de 0,25 m/s. El proyecto también tuvo en cuenta el sistema de alcantarillado de la zona para que no hubiera contaminación del sistema ecológico recién establecido. Entre los principales beneficios cuantitativos añadidos figuran: protección contra inundaciones de hasta 200 años, manteniendo un caudal de hasta 118 milímetros por hora; aumento de la biodiversidad global en un 639% entre las obras previas a la recuperación en 2003 y finales de 2008; reducción del efecto de isla de calor urbano gracias al efecto refrigerante del arroyo, el aumento de la vegetación, la reducción de los desplazamientos en coche y el aumento de la velocidad del viento en el corredor entre un 2,2% y un 7,8%; y reducción de la contaminación atmosférica por pequeñas partículas en un 35%, de 74 a 48 microgramos por metro cúbico (ADB, 2016). En la figura 30 se puede ver parte del proyecto de restauración del río Cheonggyecheon.

Figura 30: Parte del río Cheonggyecheon restaurado



Fuente: Wang (2014)

Además, en 2014, se creó el Centro Coreano de Instalaciones de Verificación de *Low-impact Development* (LID), con el objetivo principal de aplicar nuevas prácticas de LID e infraestructura verde y verificar sus resultados a largo plazo mientras se restablecen las condiciones ambientales naturales. Los resultados de la investigación se recopilaban a partir de diferentes tipos de soluciones aplicadas en distintos lugares del área metropolitana de Seúl para episodios de precipitaciones con una intensidad de 50 mm/h a 120 mm/h. Los resultados monitorizados mostraron que para unos 888 pavimentos permeables aplicados a una superficie de 1.478.492 m² el volumen total de esorrentía se redujo en 25.461 m³/h. La cubierta verde se aplicó en 757 lugares sobre una superficie total de unos 332.637 m². Del mismo modo, las zanjas de infiltración, las cajas de infiltración y las cisternas también se aplicaron en diferentes superficies de 73.262 m², 6609 m² y 333.583 m², respectivamente. Con eso, el valor total de la reducción del volumen de esorrentía de aguas pluviales de la gestión de las aguas pluviales, mediante la aplicación de diferentes prácticas de LID en diferentes zonas, fue de aproximadamente 35.823 m³/h en comparación con 2016. El estudio también encontró que estas medidas fueron más eficientes para eventos con una intensidad de 50 mm/h (SHAFIQUE; KIM, 2018).

3.3.3. Estados Unidos

Un tercio de la ciudad de Portland, del estado de Oregon en el Estados Unidos, tiene un sistema de colectores combinados que transporta la escorrentía de las aguas pluviales y las aguas residuales para su tratamiento utilizando una única tubería. Con la expansión urbana de la ciudad, estos sistemas se han vuelto cada vez más ineficientes, lo que ha provocado un aumento de la frecuencia de los desbordamientos del alcantarillado combinado y, en consecuencia, ha afectado directamente a la calidad del agua y a la salud de la comunidad. Por ello, entre 1990 y 2011, la ciudad amplió primero su infraestructura gris, como túneles e instalaciones de tratamiento, para reducir este tipo de eventos y limpiar los cursos de agua locales (CITY OF PORTLAND, 2023a). Además, la ciudad también ha puesto en marcha una serie de programas, políticas e incentivos para fomentar el uso de SbN urbanas que ayuden a mantener las aguas pluviales fuera del alcantarillado combinado y a controlar los desbordamientos, como el programa *Green Streets*. Desde 2007, el programa ha instalado pavimentos permeables y *bioswales*⁴ por toda la ciudad y ha conseguido reducir entre un 80 y un 94% los picos de caudal en las zonas seleccionadas (CITY PARKS ALLIANCE, 2023). Las autoridades de Portland calculan que los 9 millones de dólares de su cartera total de inversiones en SbN han supuesto un ahorro de 224 millones de dólares en costes relacionados con reparaciones y mantenimiento relacionados a desbordamientos del alcantarillado combinado (EPA, 2010). A continuación, un ejemplo de calle verde de Portland (FIG. 31).

⁴ Más informaciones sobre ese tipo de SbN en: <https://nrcsolutions.org/bioswales/>

Figura 31: Albina Triangle como parte del proyecto Green Streets en Oregon, Estados Unidos



Fuente: City of Portland (2023b)

3.3.4. Holanda

Según OPPLA (2023), la ciudad de Rotterdam, en Holanda, aspira a ser 100% resistente al clima en 2025 y para ello cuenta con un programa de adaptación que mezcla infraestructuras grises con infraestructuras verdes y azules que, combinadas, tienen una función de "esponja" para captar y almacenar el agua de lluvia y ralentizar el drenaje. Entre las medidas de adaptación a fenómenos de lluvia extrema destacan la instalación de más de 130.000 m² de cubiertas verdes, la construcción de espacios de almacenamiento de agua, como el depósito subterráneo del aparcamiento del Parque de los Museos, con capacidad para 10.000 m³, y la integración de "corredores verde-azules" en el paisaje urbano. Estos corredores verde-azules, que abarcan cursos de agua y lagos, están diseñados para facilitar los procesos hidrológicos naturales, como la reposición de las aguas subterráneas, minimizando las inundaciones urbanas y mejorando la calidad de vida de la ciudad. También ayudan a conectar estructura y función en el paisaje de la ciudad, además de tener un impacto directo en la biodiversidad, aumentando la riqueza y composición de las especies de vegetación autóctona e incrementando indirectamente el secuestro de carbono en estas zonas. Este tipo de iniciativas también contribuyen a combatir el efecto isla de calor en el centro urbano y a la salud de su población mediante la creación de espacios recreativos (OPPLA,

2023). En la figura 32 se muestra un ejemplo de infraestructura verde-azul en Rotterdam.

Figura 32: Las zonas verdes de Rotterdam



Fuente: Derkzen (2016)

3.3.5. Mozambique

De acuerdo con *The World Bank* (2017) y *The World Bank* (2018), durante años, la ciudad costera de Beira, en Mozambique, se ha visto afectada por violentas tormentas e inundaciones recurrentes. Con asentamientos mal planificados, viviendas inadecuadas y el agravamiento de los efectos del cambio climático, más de 300.000 residentes se han vuelto vulnerables a los desastres relacionados con el clima. En este contexto, a través del Proyecto Ciudades y Cambio Climático de Mozambique, financiado con un crédito de 120 millones de dólares de la *International Development Association* (IDA), la ciudad reforzó su resiliencia rehabilitando su sistema de drenaje de aguas pluviales. Las mejoras incluyeron la rehabilitación/construcción de 11 kilómetros de canales de drenaje, la instalación de estaciones de control de inundaciones, la construcción de una gran cuenca de retención de agua y la plantación de 2.200 manglares con una función activa de mitigación de inundaciones. El proyecto también ayudó a aplicar el plan director de la ciudad, que, entre otras cosas, propone las SbN como medidas a largo plazo para aumentar la resiliencia ante fenómenos extremos. La segunda fase del proyecto incluyó el desarrollo de una solución de infraestructura verde polivalente a lo largo del tramo del río Chiveve en Beira, que funciona como un parque verde urbano que ofrece

servicios ecosistémicos (biodiversidad, drenaje, refrigeración urbana y mitigación de inundaciones), así como oportunidades económicas y recreativas para los ciudadanos de Beira. Se estima una reducción de 70% en los riesgos de inundaciones con las iniciativas (THE WORLD BANK, 2017; THE WORLD BANK 2018). A continuación, parte del parque urbano de la ciudad de Beira (FIG. 33).

Figura 33: Parque urbano junto al río Chivere en la ciudad de Beira, Mozambique



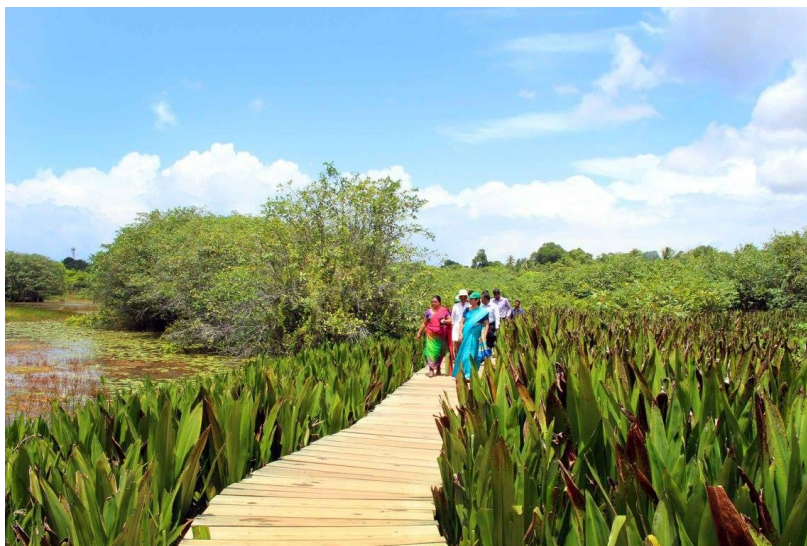
Fuente: KFW (2022)

3.3.6. Sri Lanka

El informe del GFDRR y *The World Bank Group* (2018) analiza la aplicación de las SbN en el área metropolitana de Colombo, en Sri Lanka. El municipio está originalmente rodeado de grandes humedales naturales y artificiales interconectados que ayudan a retener las aguas de las inundaciones. Sin embargo, la rápida urbanización de las últimas décadas ha provocado la degradación constante de los humedales y una reducción del 30% en la capacidad de retención de agua de estos ecosistemas. En 2010, la ciudad sufrió una serie de inundaciones récord que provocaron pérdidas económicas sin precedentes. En este contexto, para reducir los riesgos de inundación, el Gobierno de Sri Lanka puso en marcha el *Metro Colombo Urban Development Project*, que combina infraestructuras verdes y grises: conservación de humedales, parques de retención de inundaciones y muros tradicionales de hormigón para la protección de las riberas. La integración de humedales y parques de inundación permite que el agua de lluvia se infiltre lentamente, reduciendo el volumen de agua que debe transportar el sobrecargado sistema

construido. Según el análisis económico, cuantos más humedales se conserven, mayor será el rendimiento en términos de protección contra inundaciones y otros beneficios, como el tratamiento de aguas residuales. Uno de esos humedales está en la figura 34.

Figura 34: Humedal preservado en el Parque del Humedal de Beddagana



Fuente: MCUDP (2017)

3.3.7. Vietnam

De acuerdo con ADB (2016), la ciudad vietnamita de Ho Chi Minh, situada en el estuario del río Saigón-Dong Nai, es una de las urbes más amenazadas del mundo por el cambio climático global, ya que se enfrenta a riesgos de subida del nivel del mar, tormentas e inundaciones, intensificados por su intenso proceso de urbanización. Actualmente, sólo el 0,25% de la ciudad está cubierta de vegetación. Los canales naturales de drenaje han sido rellenados, invadidos y bloqueados por los residuos. La contaminación del agua y del aire son graves problemas de salud, sobre todo porque las urbanizaciones situadas río arriba cortan el suministro y el flujo de agua durante los periodos de sequía. Sin embargo, en respuesta a la degradación del entorno urbano, se observa el inicio de una tendencia a promover los edificios verdes, es decir, edificios resistentes, sostenibles y que mejoran las condiciones ambientales y de vida. En este contexto, se han utilizado cubiertas y muros verdes y pavimentos permeables para gestionar el agua, las inundaciones y la contaminación. El objetivo del proyecto es devolver los espacios verdes a la ciudad albergando viviendas de alta densidad con árboles tropicales. Los tejados se diseñaron para retener el agua de lluvia y evitar

inundaciones, con tierra de más de 1,5 metros de profundidad. Con esta gruesa capa de tierra, las "macetas" actúan como cuencas de retención del agua de lluvia, a ejemplo de la figura 35. Además de los tejados verdes, el suelo está construido con ladrillos permeables que aumentan la infiltración durante la estación lluviosa. Entre los principales beneficios medioambientales del proyecto destacan: mejora de la calidad del aire y del agua; reducción de la temperatura y del efecto isla de calor; aumento y protección de la biodiversidad; creación de oportunidades para la recogida y almacenamiento de agua; y reducción de las inundaciones y de la presión sobre las infraestructuras locales de drenaje (ADB, 2016).

Figura 35: Pot Plant House en Ho Chi Minh, Vietnam



Fuente: Trending City (s.f.)

Una vez analizado el potencial de las SbN como estrategia global de adaptación al clima, se vuelve a la zona de estudio.

4. Caracterización geofísica de la cuenca Arrudas frente a las inundaciones

La caracterización de los factores físicos y geocológicos del área de estudio es relevante debido a las influencias que pueden ejercer sobre el drenaje de la cuenca hidrográfica y, por tanto, sobre las estrategias de adaptación ante las inundaciones urbanas provocadas por los eventos climáticos extremos.

4.1. Clima

En cuanto al clima de la cuenca del Arrudas, se puede inferir que es equivalente al clima del municipio de Belo Horizonte. En este trabajo, la caracterización y comparaciones serán realizadas con base en las *Normais Climatológicas*⁵ de 1991-2020 y otros horizontes espaciales que se consideren pertinentes. Para todos los casos se utilizó datos climáticos de la estación “BELO HORIZONTE” (83587) ubicada en la cuenca, con excepción de los datos de 1931 a 1939, que se tomaron de la antigua estación situada en la *Praça da Liberdade*, también dentro de los límites de la cuenca facilitados por Assis (2023). En la tabla 5, es posible observar un resumen de las medias diarias de los principales parámetros climáticos por mes para la normal climatológica actual (1991-2020). Se ha utilizado la temperatura media compensada, ya que es más real considerando los procedimientos en las estaciones meteorológicas convencionales⁶.

Tabla 5: Medias climáticas diarias por mes y media anual basadas en las Normais Climatológicas 1991-2020 Belo Horizonte

Mês	Evaporación de Piche media diaria (mm)	Precipitación total media diaria (mm)	Temperatura máxima media diaria (°C)	Temperatura media compensada diaria (°C)	Temperatura mínima media diaria (°C)	Humedad relativa media diaria (%)	Velocidad viento media diaria (m/s)
Ene	4,56	10,69	28,67	23,73	20,01	69,35	1,47
Feb	5,16	6,29	29,07	24,03	20,17	66,18	1,55
Mar	4,45	6,37	28,42	23,49	19,77	68,63	1,46
Apr	4,42	2,74	27,57	22,61	18,82	66,30	1,41
May	4,30	0,91	25,66	20,55	16,59	64,27	1,40
Jun	4,37	0,38	24,91	19,61	15,43	62,63	1,40
Jul	5,03	0,17	24,91	19,44	15,15	58,35	1,48
Ago	6,01	0,34	26,33	20,50	15,85	54,04	1,66
Sep	6,52	1,64	27,87	21,99	17,40	55,27	1,73
Ocu	6,10	3,55	28,66	23,04	18,79	59,92	1,73
Nov	4,57	7,87	27,68	22,70	18,92	68,48	1,57
Dic	4,12	10,94	28,19	23,26	19,53	71,03	1,45
Anual	4,97	4,32	27,33	22,08	18,04	63,70	1,53

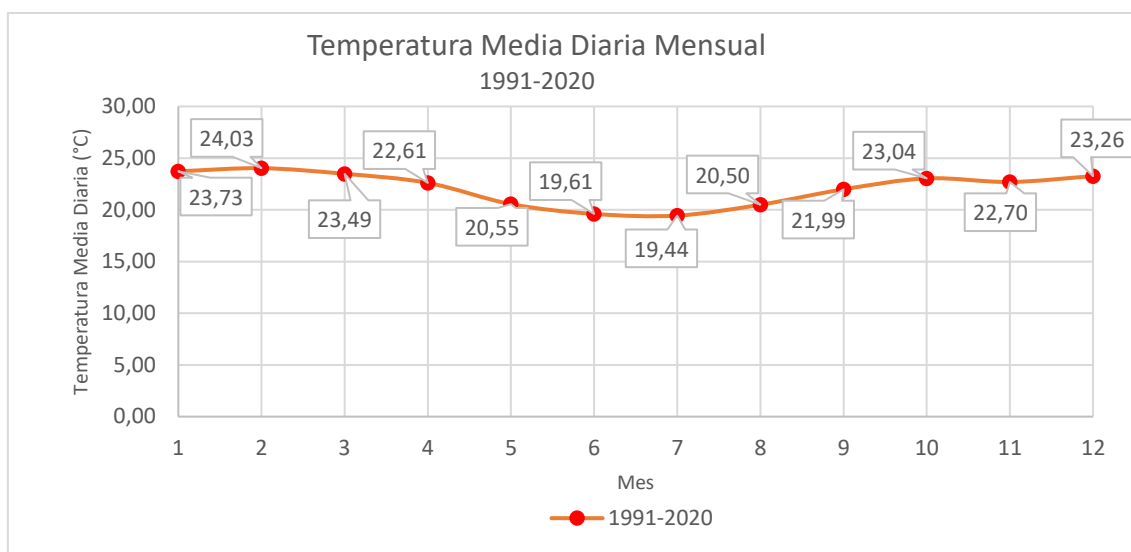
Fuente: Adaptado de INMET (2023)

Los gráficos 9 y 10 muestran cómo se distribuyeron en el tiempo durante el año los algunos de los parámetros relevantes en este estudio: temperatura y precipitación. Las variables elegidas como muestras son la temperatura media y la precipitación mensual total.

⁵ Medias de datos climatológicos calculados para períodos consecutivos de 30 años, que comúnmente son usados para clasificar el clima de una determinada ubicación.

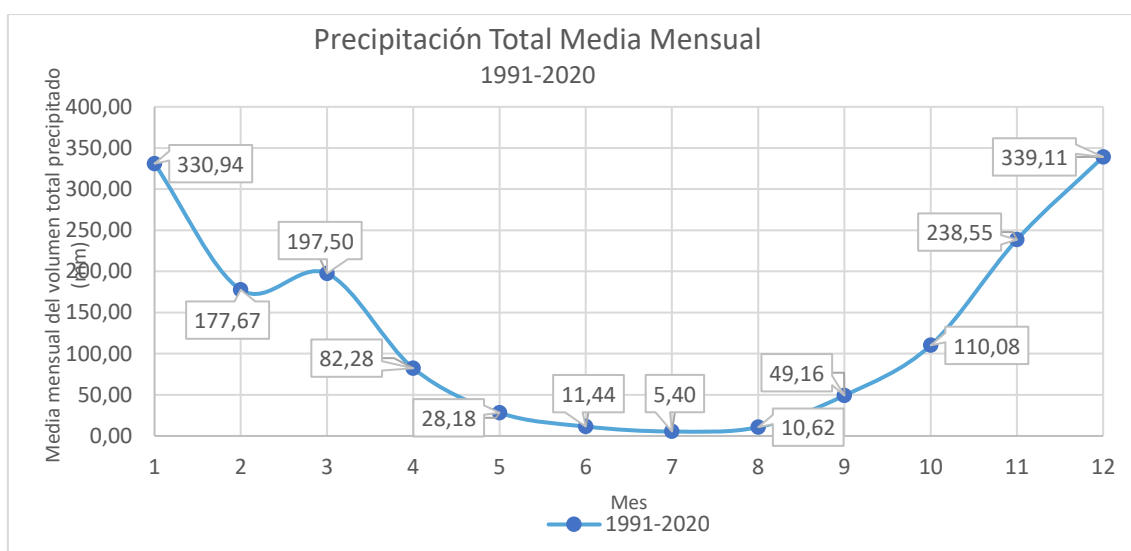
⁶ Más informaciones sobre temperatura media compensada en SGB (2014).

Gráfico 9: Temperatura Media Diaria Mensual Belo Horizonte Normais Climatológicas 1991-2020



Fuente: Adaptado de INMET (2023)

Gráfico 10: Precipitación Total Media Mensual Belo Horizonte Normais Climatológicas 1991-2020

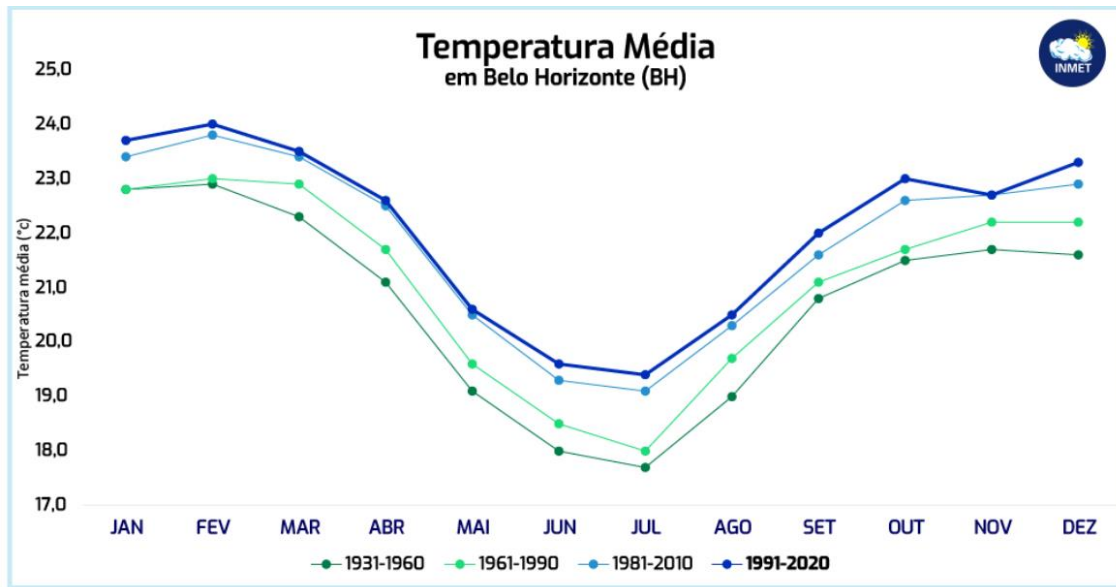


Fuente: Adaptado de INMET (2023)

Si se observan los gráficos, se puede ver que el clima de la cuenca se divide básicamente en dos periodos: uno más seco, con temperaturas más bajas, que coincide sobre todo con los meses de invierno (junio, julio y agosto), y otro más húmedo, con temperaturas ligeramente más altas, principalmente durante el verano (diciembre, enero, febrero). Según los datos, el récord histórico de precipitación total diaria fue 171,8 mm (24/01/2020) y de volumen total mensual fue 934,7 mm (12/2020), temperatura diaria máxima 37,4 °C (22/10/2015) y temperatura diaria mínima 8 °C (09/06/1997).

Además de las proyecciones mundiales y regionales futuras y caracterización del clima, conviene observar las tendencias con datos que ya se han medido. En este contexto, el INMET (2022) hace la siguiente comparación entre la temperatura de las últimas cuatro normales climatológicas para el municipio de Belo Horizonte (GRÁ. 11).

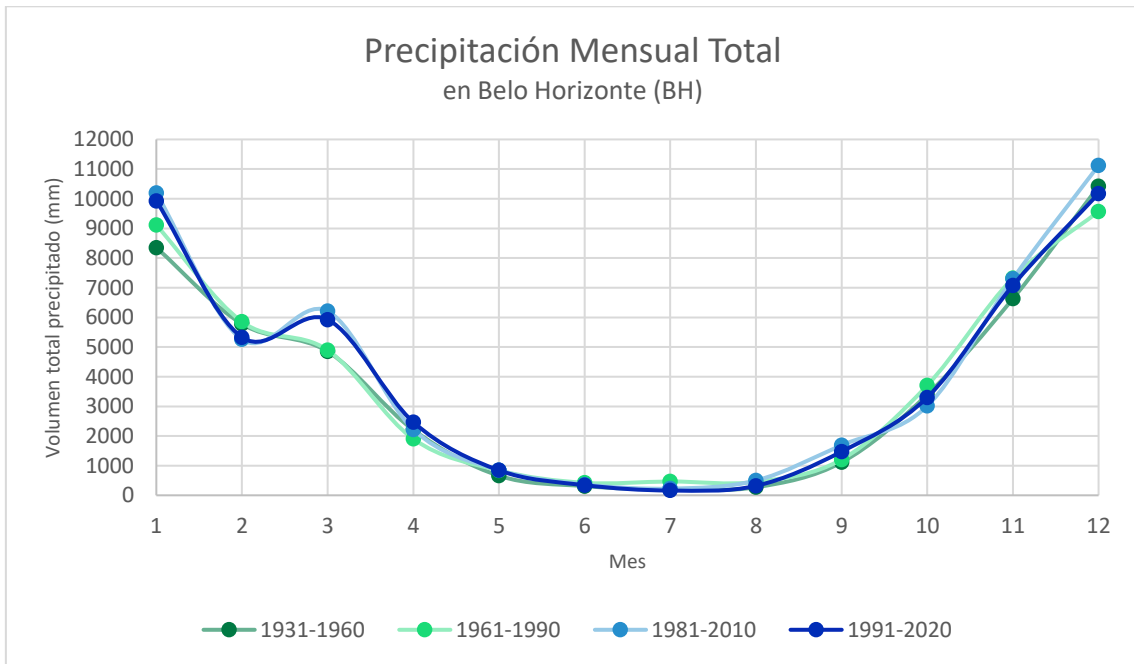
Gráfico 11: Comparación entre las normales climatológicas de los períodos 1931-1960, 1961-1990, 1981-2010 y 1991-2020 para la temperatura media en Belo Horizonte-MG



Fuente: INMET (2022)

Como puede verse en el gráfico 11, la temperatura media de Belo Horizonte ha ido aumentando a lo largo de los años, una tendencia que potencialmente continuará a medida que se agrave el cambio climático. Para este estudio, también es fundamental observar las tendencias de las precipitaciones a lo largo del tiempo, que están fuertemente correlacionadas con las tendencias de temperatura. Así, al igual que la comparación realizada por el INMET (2022), el gráfico 12 muestra una comparación entre las 4 normales climatológicas para la precipitación mensual total.

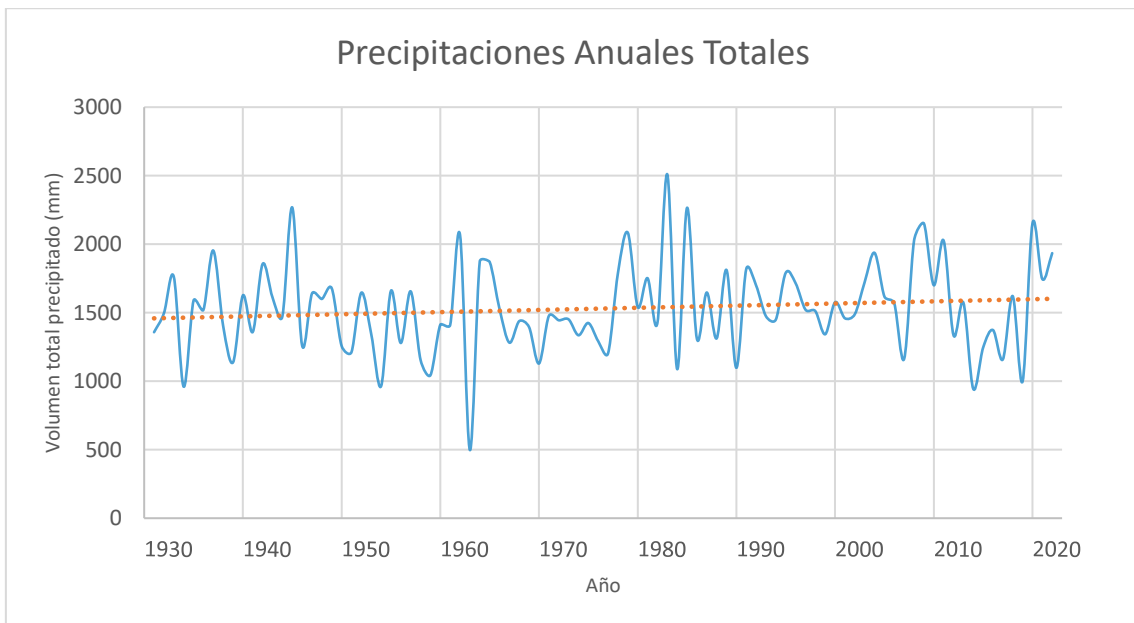
Gráfico 12: Comparação entre as normais climatológicas para os períodos de 1931-1960, 1961-1990, 1981-2010 e 1991-2020 para a precipitação mensal total em Belo Horizonte-MG



Fuente: Adaptado de INMET (2023)

A diferencia de la temperatura, no existe un patrón explícito de aumento o disminución de las precipitaciones en los escenarios climáticos de 30 años analizados. Sin embargo, al comparar los valores de precipitación total anual de 1931 a 2022, es posible observar una ligera tendencia de incremento, como se muestra en el gráfico 13.

Gráfico 13: Precipitación total anual de 1931 a 2022 en Belo Horizonte

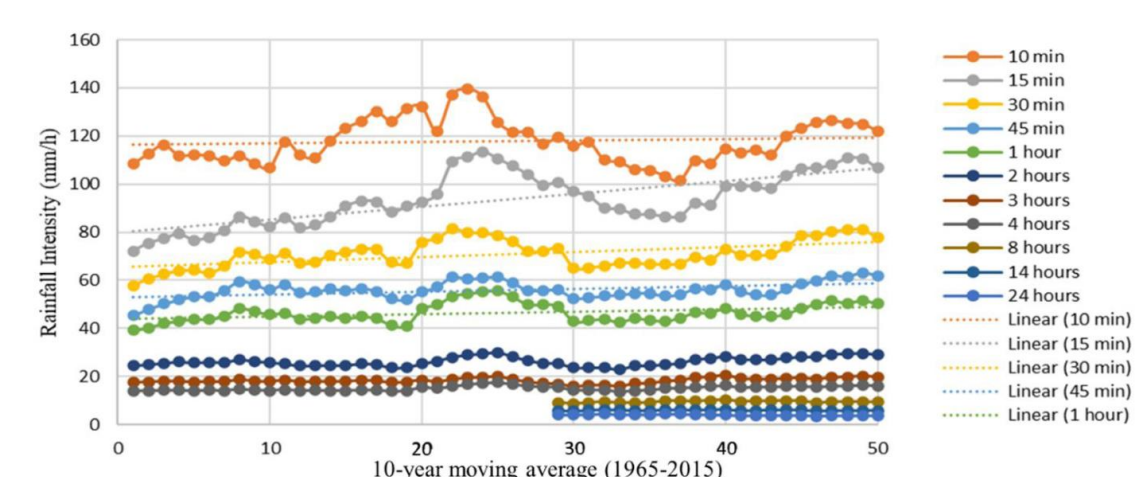


Fuente: Adaptado de INMET (2023)

Además de las tendencias en el volumen de precipitaciones, analizar las tendencias en la intensidad de los episodios de precipitaciones es extremadamente importante cuando se trata de adaptarse al cambio climático por el control de las inundaciones. Nunes *et al.* (2018) realizaron análisis de medias móviles de periodos de 10 años para comprobar el comportamiento de las intensidades para diferentes duraciones de precipitación a lo largo de los años en Belo Horizonte. Para ello, se calcularon 50 medias móviles, la primera de 1956 a 1965 y la última de 2005 a 2014. Se observaron tendencias definidas hacia lluvias más cortas, a veces positivas y a veces negativas. Para los autores, aunque se pueda creer que las variaciones cíclicas a lo largo de la serie caracterizan la ausencia de tendencias, pueden representar períodos críticos para una determinada región, tanto en términos de escasez como de inundaciones, y por lo tanto no pueden ser ignoradas.

Sin embargo, un hecho relevante para este estudio es que considerando duraciones iguales o inferiores a 1 hora, que son las más críticas para los sistemas de drenaje urbano, por implicar un volumen de precipitación contenido en un corto espacio de tiempo, las tendencias observadas apuntan a un aumento de la intensidad de estos eventos a partir del año 2000. El análisis de las medias móviles de intensidad para las distintas duraciones se muestra en el gráfico 14.

Gráfico 14: Análisis de la media móvil decenal de las intensidades máximas registradas considerando todas las duraciones de las precipitaciones

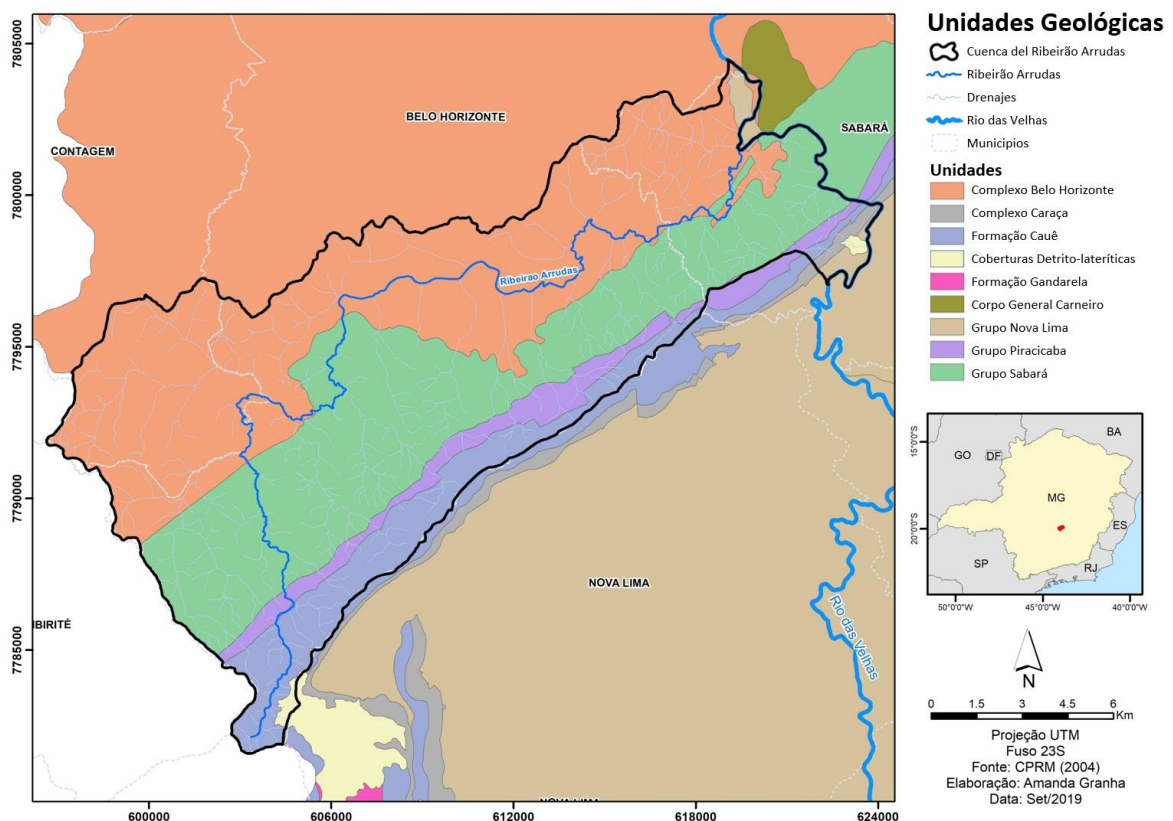


Fuente: Nunes *et al.* (2021)

4.2. Geología

Según Oliveira (2009), en el territorio de Belo Horizonte se destacan dos unidades geológicas: el Dominio del Complejo de Belo Horizonte y el *Domínio das Sequências Metassedimentares* del *Supergrupo Minas*. En este, se subdividen los Grupos Itabira (*Formação Cauê* e *Gandarela*), Piracicaba (*Formação Cercadinho*, *Fecho do Funil*, *Taboões* e *Barreiro*) y Sabará. En menor escala, están las Rocas Intrusivas y las Formaciones Superficiales (FIG. 36). El primer dominio está más concentrado al norte de Ribeirão Arrudas y su litología se altera, normalmente, con relativa facilidad, dando lugar a suelos areno-arcillosos. La *Sequência Metassedimentar*, por otro lado, difiere de la otra en relación a su naturaleza y espesor de suelo, debido a su diversidad litoestructural y morfológica, que se refleja en sus subdivisiones (OLIVEIRA, 2009).

Figura 36: Unidades geológicas de la cuenca del Ribeirão Arrudas



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

La relevancia del análisis geológico para el objeto de estudio de este trabajo está relacionada con el potencial de infiltración de la cuenca que a su vez está altamente correlacionado con la formación de inundaciones. Oliveira (2009) resumió la conductividad hidráulica típica de Belo Horizonte variando en el rango de 10^{-4} a 10^{-5}

cm/s, a través de los ensayos realizados por Costa (2002). Dentro de este rango, el Complejo de Belo Horizonte presenta una conductividad media de $1,1 \times 10^{-4}$ cm/s que, según Costa (2002), es una conductividad relativamente alta para suelos arenos-arcillosos. En la *Sequência Metassedimentar*, el Grupo Sabará presenta una conductividad equivalente a $6,3 \times 10^{-5}$ cm/s, la *Formação Gandarela* (Grupo Itabira) a $4,2 \times 10^{-5}$ cm/s y la *Formação Cercadinho* (Grupo Piracicaba) a $6,0 \times 10^{-4}$ cm/s.

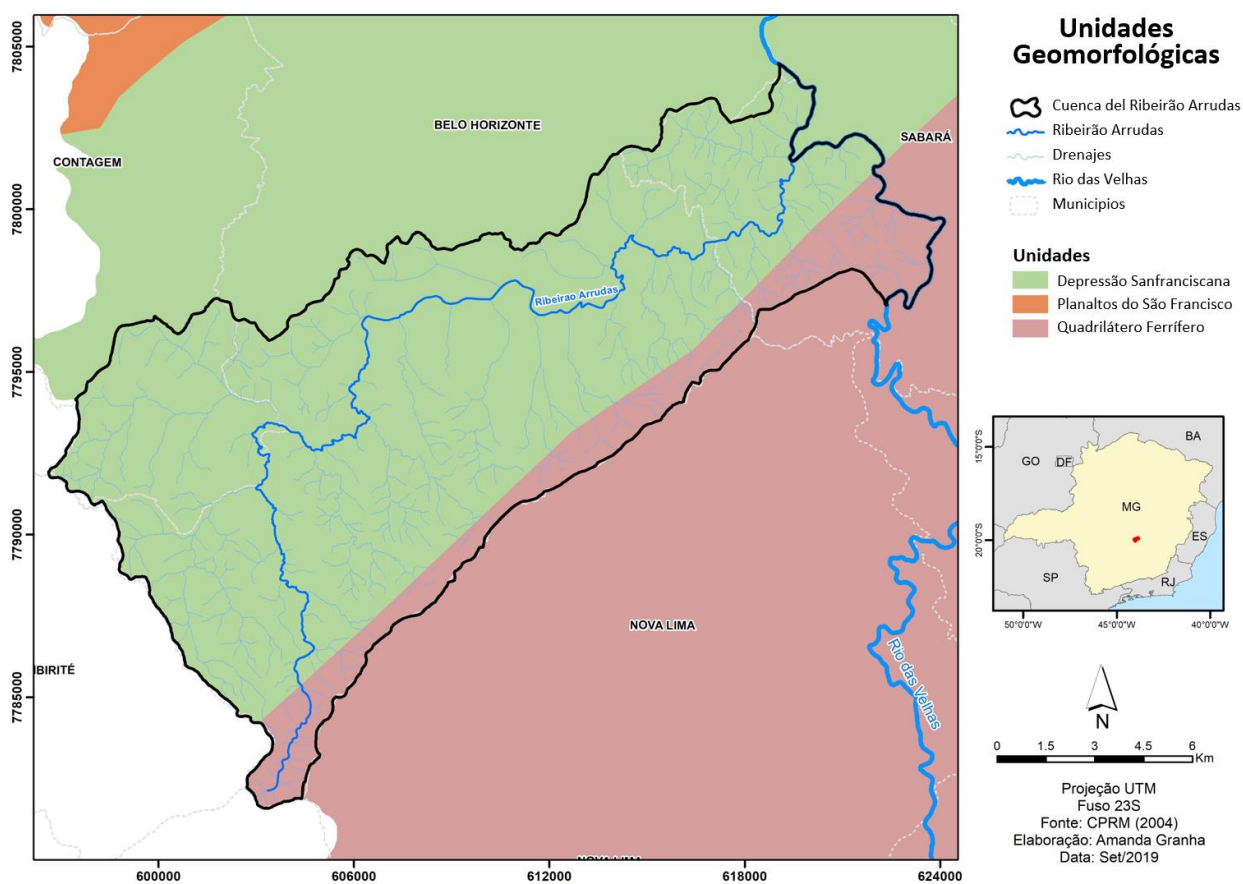
Oliveira (2009) correlaciona los valores de conductividad hidráulica con los niveles de permeabilidad de cada unidad litológica. Según el autor, los suelos permeables presentan conductividades hidráulicas superiores a 10^{-5} cm/s y los suelos que tienen coeficientes próximos a 10^{-4} cm/s están en el límite entre bien o mal drenados, lo que equivale a infiltración seguida de percolación. Así, el Complejo Belo Horizonte y la *Formação Cercadinho* (Grupo Piracicaba) tienen permeabilidad moderada, y el Grupo Sabará y la *Formação Gandarela* (Grupo Itabira) tienen permeabilidad baja (OLIVEIRA, 2009).

Cuanto menor sea la impermeabilidad de una determinada zona, mayor será la influencia ejercida por las unidades geológicas sobre las tasas de infiltración de esta misma zona, ya que sus características influyen en la cantidad de agua que infiltra y percola por el suelo. En el caso de la cuenca del Ribeirão Arrudas, debido a su elevada impermeabilidad, las variaciones geológicas territoriales ejercen poca interferencia en las tasas de infiltración locales. Teniendo en cuenta las características hidráulicas de las unidades, lo ideal sería mantener regiones menos impermeables en la parte del territorio del Complejo Belo Horizonte de la cuenca, con el fin de maximizar la infiltración y minimizar el flujo superficial y consecuentes inundaciones.

4.3. Geomorfología

Los dominios geomorfológicos están vinculados a las características geológicas de la región e interfieren directamente en los ejes preferenciales de drenaje de la cuenca. La cuenca del Ribeirão Arrudas está cubierta en su mayor parte por parte de la *Depressão Sanfranciscana* y el resto de su territorio por el dominio del *Quadrilátero Ferrífero* (FIG. 37).

Figura 37: Unidades geomorfológicas de la cuenca del Ribeirão Arrudas



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

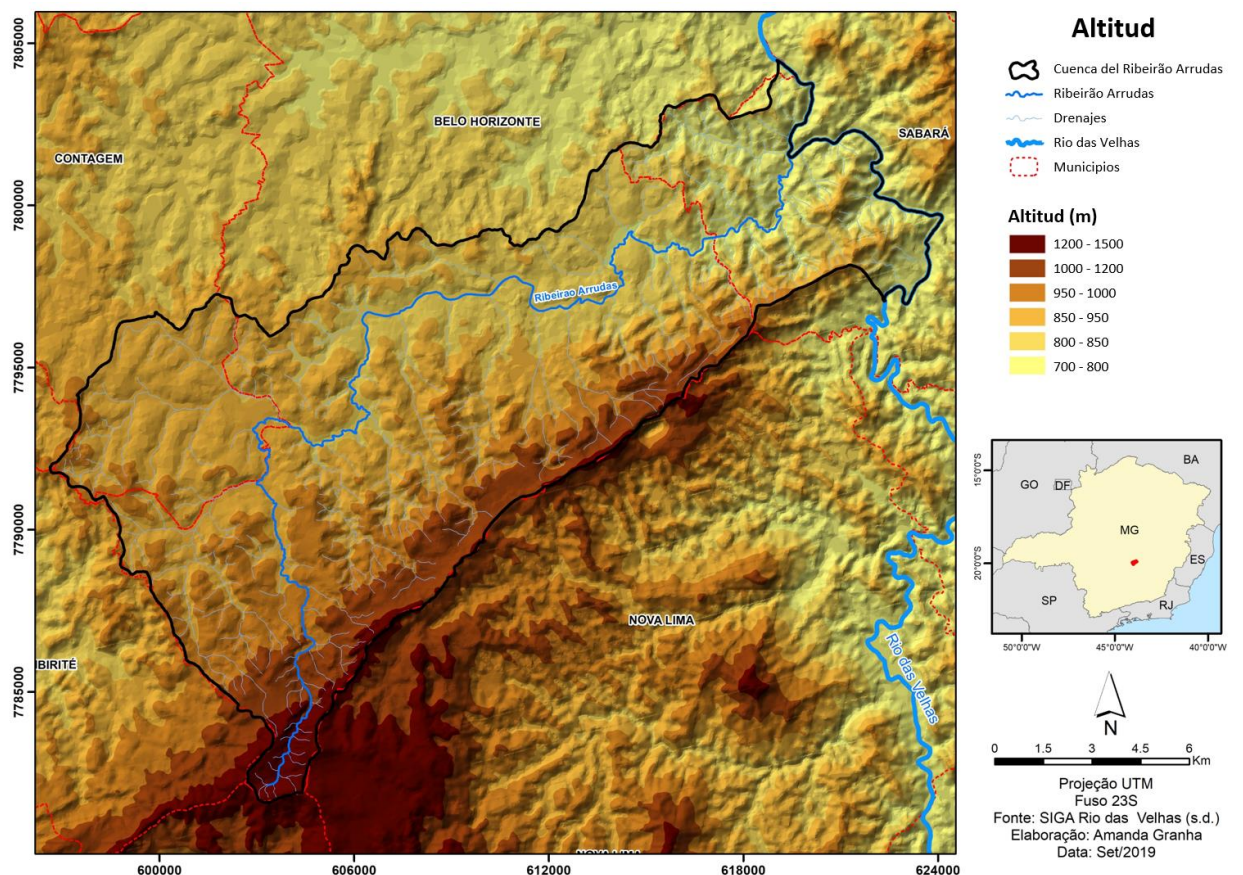
Según Cajazeiro (2012), el área correspondiente a la *Depressão Sanfranciscana* presenta morfología baja, como suaves colinas de vertientes cóncavo-convexas. La evolución de la geomorfología de esta unidad es el resultado de la erosión fluvial de los principales cursos de agua de Belo Horizonte, incluyendo el Ribeirão Arrudas (OLIVEIRA, 2009). El *Quadrilátero Ferrífero*, a su vez, presenta una morfología montañosa, donde se encuentran las mayores altitudes y desniveles de la región, así como los manantiales que dan origen al *ribeirão*. En el contexto geomorfológico del *quadrilátero*, es más probable que el agua de lluvia se convierta en escorrentía superficial que en infiltración, a diferencia de las regiones más bajas próximas a la confluencia del Ribeirão con el Río das Velhas, que acaban convirtiéndose en zonas de depósitos aluviales.

La cuenca hidrográfica del Ribeirão Arrudas presenta una altitud que varía entre 750 m y 950 m, predominando las superiores a 850 m (OLIVEIRA, 2009). Los niveles altimétricos más bajos se encuentran cerca del lecho del Ribeirão en su curso medio y bajo. En las figuras 38 y 39, es posible observar como las altitudes se distribuyen a lo

largo de la cuenca y como la pendiente se manifiesta en el relevo. En cuanto a la susceptibilidad erosiva, la UTE presenta fragilidad fuerte a la erosión en la mayor parte de su territorio, cerca del 80,97% de la superficie, y fragilidad media en cerca del 18,52% (CBH VELHAS, 2016).

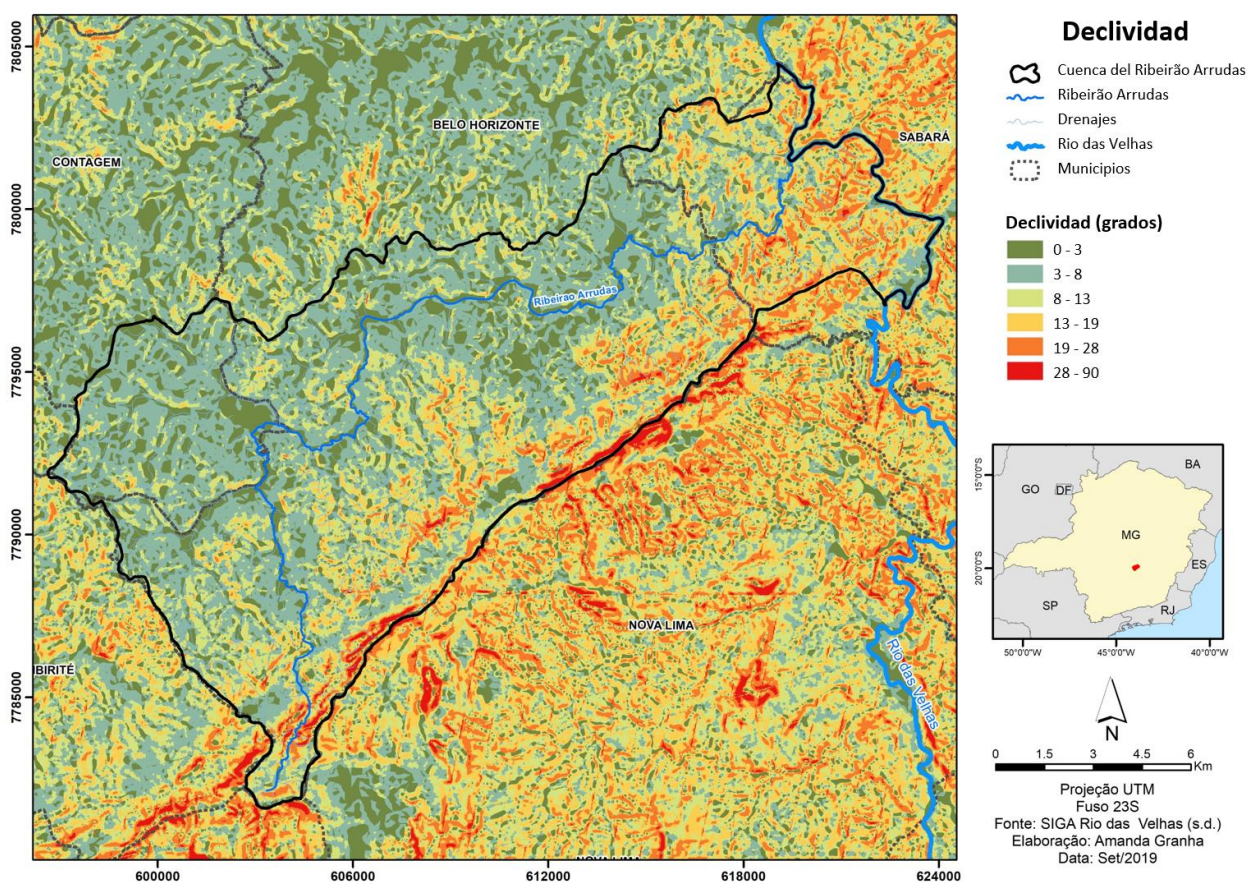
Además de la interferencia en el drenaje, la geomorfología es muy relevante para el análisis del comportamiento climático, ya que influye directamente en la temperatura, la humedad relativa del aire y los cambios en la dirección e intensidad de los vientos (ASSIS, 2010). Las unidades geomorfológicas, en el medio urbano, pueden actuar como facilitadoras del intercambio energético y de la circulación del viento o como obstáculos, así como los cañones urbanos actúan a menor escala dentro de la trama urbana. En cuanto a los vientos, la fricción y la rugosidad del relieve combinadas con los edificios generan y conducen estas circulaciones.

Figura 38: Mapa de altitud de la cuenca del Ribeirão Arrudas



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

Figura 39: Mapa de pendientes de la cuenca del Ribeirão Arrudas



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

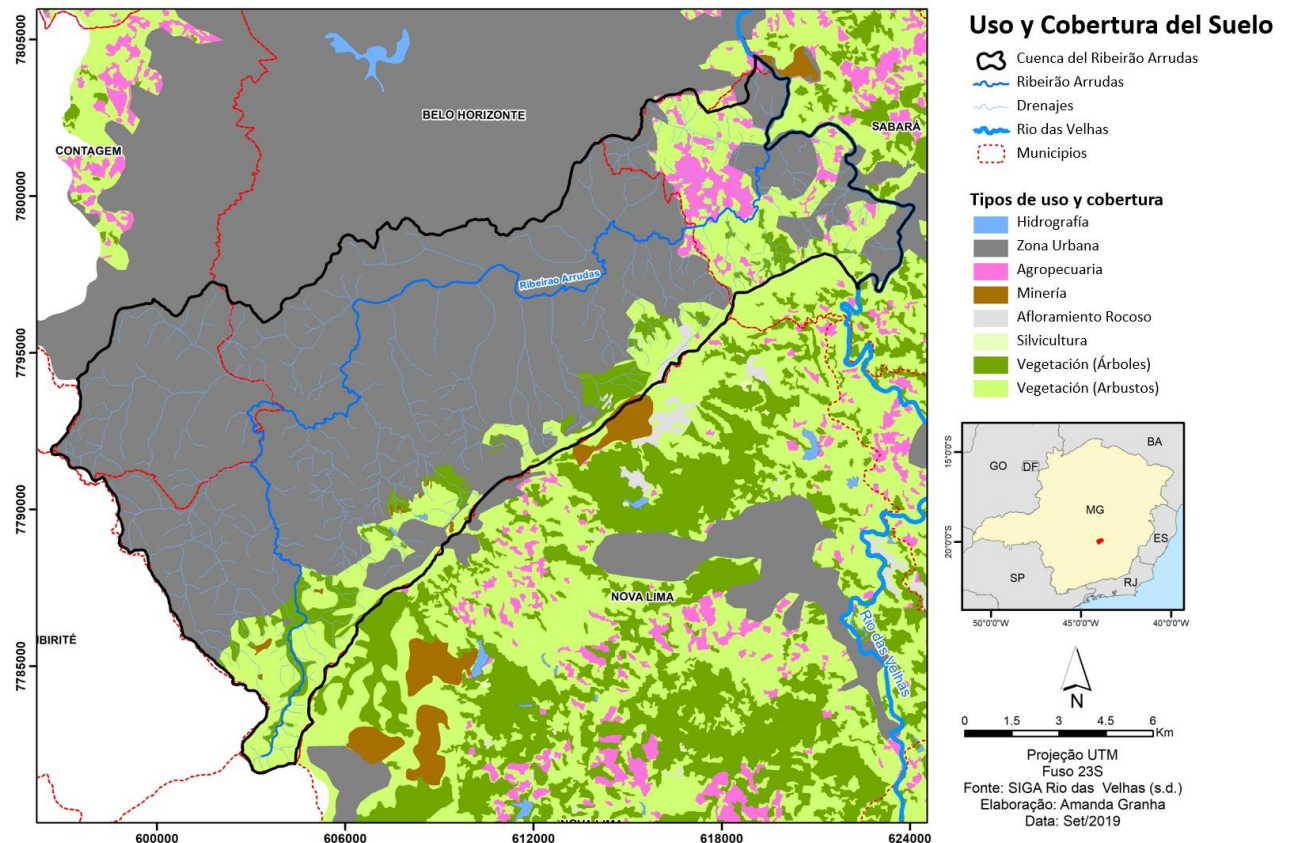
4.4. Uso y ocupación del suelo

El UTE Ribeirão Arrudas está ocupado, según CBH Velhas (2016), mayoritariamente por zonas urbanas, lo que equivale a cerca del 75,7% de la superficie y se caracteriza por un uso intensivo del suelo, debido a la presencia de edificios y una expresiva red de carreteras. Como ya mencionado, los cambios en el uso del suelo asociados al proceso de urbanización están estrechamente vinculados a cambios en el comportamiento hidrológico local y, consecuentemente, en el microclima urbano.

Con la eliminación de la cubierta vegetal para la construcción de los diversos elementos urbanos, se produjo una pérdida de zonas permeables que permitirían la infiltración y la escorrentía subterránea, lo que se traduce en una mayor acumulación de escorrentía superficial y posibilidad de inundaciones. Además, la eliminación de la vegetación junto con el cierre de los cursos de agua hace que la energía que se utilizaría como calor latente para la evapotranspiración permanezca en la atmósfera, lo que altera el microclima urbano por el aumento de la temperatura.

La figura 40 muestra que la mayor parte de la cuenca del Ribeirão Arrudas está urbanizada. Existen algunas manchas de vegetación, divididas en arbóreas y arbustivas, en la porción sudeste de la cuenca y en la porción este localizada en el municipio de Sabará, donde también es posible observar la ocupación del suelo por la agricultura y la ganadería.

Figura 40: Uso y cobertura del suelo



Fuente: Adaptado de Silva (2019)

Teniendo en cuenta todas las características del territorio mencionadas, a continuación, se proponen los cambios en la ocupación del suelo mediante la aplicación de SbN.

5. El futuro mediante premisas del cambio climático y adaptación con el uso de SbN

Con el desarrollo del marco teórico de los dos temas principales de este estudio: el cambio climático y la resiliencia urbana; añadido a la caracterización del área del estudio, se pretende demostrar cómo estos conceptos se relacionan con la realidad de la cuenca del Ribeirão Arrudas en Belo Horizonte. Para ello, como ya se ha mencionado, se utiliza el modelo hidrológico TETIS, v. 9, como forma de cuantificar los efectos de la

aplicación de SbN en la hidrología de esta cuenca como herramienta de adaptación climática. Según su descripción elaborada por Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida de la *Universitat Politècnica de València* (GIMHA, 2021), el objetivo del programa es obtener la respuesta hidrológica más precisa posible resultante de episodios de precipitación de lluvia o de nieve, considerando los diferentes procesos físicos involucrados en el área de estudio y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual (esquema conceptual del modelo presente en la metodología, figura 15).

Para demostrar la hipótesis inicial planteada en este estudio, se simulan tres situaciones diferentes, además de la calibración y validación (proceso mediante el cual se demuestra que el modelo es aceptable). En primer lugar, con el fin de comparar con los escenarios futuros, se utilizan datos modelizados del periodo de referencia (1980-2013), para estimar el caudal histórico del río Arrudas. En segundo lugar, se simula el mismo tipo de comportamiento de la cuenca con las proyecciones de SSP2-4,5, la trayectoria intermedia, y SSP5-8,5, la trayectoria extrema, para el periodo comprendido entre 2015 y 2100. Al igual que en las simulaciones para el periodo de referencia, los datos futuros utilizados son los de CABra 657 (ver figura 14), que en este estudio se considera suficientemente aproximada a la cuenca del Ribeirão Arrudas y que han sido facilitados por Ballarin et al (2023). Por último, se considera una simulación con los mismos datos climáticos futuros, pero con la aplicación de SbN, es decir, con las características del suelo modificadas para una mayor permeabilidad. En todos casos fue considerado la cobertura y uso del suelo de 2018.

5.1. Calibración automática y validación del modelo

Para asegurarse de que los resultados simulados son suficientemente representativos del comportamiento hidrológico de la cuenca, fue necesario realizar una calibración automática dentro de TETIS y posterior validación. Para eso se utilizó la información meteorológica - precipitación y temperatura (para estimar la evapotranspiración potencial) - de INMET (2023) con resolución diaria, así como hidrometeorológicas – precipitación y caudales en punto de aforo – de PBH (2023a), estas con discretización de datos agregados a resolución diaria (los originales estaban a

10 minutos), una vez que los datos de escenarios de cambio climático son diarios. La estación de aforo utilizada en esos procesos es la estación fluviométrica 24.

Los datos de caudales de la estación fluviométrica 24 facilitados por la PBH (2023a) son de desde 7 de octubre de 2011 a 2 de febrero de 2023, sin embargo, se observó que la estación dejó de funcionar entre el 18 de mayo de 2014 y el 31 de diciembre de 2014. Por lo tanto, la calibración del modelo se ha realizado utilizando como referencia el período octubre de 2011 a julio de 2012 y el período agosto de 2012 a mayo de 2014 se utiliza como referencia para la validación temporal. Se ha descartado los datos de caudales del período 2015-2023 dado que los datos registrados son dudosos porque no mantienen órdenes de magnitud similares al período previo. Se supone que durante este periodo los cambios en la cuenca debidos a obras o fallos técnicos del sensor ultrasónico pueden haber afectado a la coherencia de los datos, además de los casos de desbordamiento del canal en los que los datos de nivel, y en consecuencia los de caudal, son irreales. No fue posible hacer validación espacial ni espacio-temporal ya que no existe otra estación de aforos o fluviométrica. El anterior enfoque se conoce como test de división de los datos o *split-sample test* y es útil para validar la hipótesis de aceptabilidad del modelo desde los resultados de la calibración y reflejar que se están reproduciendo los procesos hidrológicos de interés en condiciones contrastantes a partir de las validaciones (KLEMEŠ, 1986). En la tabla 6 es posible ver los caudales máximos anuales, y el volumen precipitado en el mismo día, y los años que fueron referencia para calibración o validación. Los datos de caudales y precipitación fueron extraídos de la estación fluviométrica 24.

Tabla 6: Caudales máximos anuales e instantáneos 2011-2023

Fecha de ocurrencia del caudal máximo ⁷	Precipitación Total diaria (mm)	Caudal máximo diario anual (m ³ /s)	Año referencia para
16/12/2011*	108,3	52,15	Calibración
15/11/2012	69,6	105,17	Calibración
25/12/2013	102,4	76,95	Validación
17/01/2014*	15,2	18,75	Validación
05/02/2015	52,0	76,23	-
30/08/2016 ⁸	0	229,031	-
19/03/2017	70,4	234,302	-
28/11/2018	falta datos	191,426	-
23/02/2019	0	258,17	-
24/01/2020	213,4	812,745	-
15/01/2021	71,6	177,377	-
08/01/2022	47,6 ⁹	151,003	-
14/01/2023*	35,6	20,173	-

Fuente: Autoría propia

A partir de los datos de la tabla anterior, se observa que, con excepción del máximo anual de 2020, todos los caudales máximos respetan un caudal máximo factible de ocurrir en el cauce del Ribeirão Arrudas, en el punto donde se localiza la estación fluviométrica 24. Esto se debe a que, al agregar los datos a escala diaria, para calcular la media, se eliminaron los valores superiores a 500 m³/s. Estos valores se deben tanto a fallos técnicos como a episodios en los que el cauce se desborda, lo que también provoca fallos en las mediciones. En 2020, sin embargo, la cifra es mayor debido a los episodios de gran magnitud mencionados en la sección 1.4. En la mayoría de los casos, la columna de volumen de precipitación ayuda a comprender los datos de caudal.

Para la calibración automática se utilizó el método *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) implementado en TETIS. Como criterios de desempeño se utilizaron los referentes sugeridos por Moriasi *et al.* (2015), en particular el índice Nash&Sutcliffe (N&S) de Nash y Sutcliffe (1970) y el error en tiempo al pico y en volumen del hidrograma. Por lo tanto, como criterio para la selección del modelo con mejor

⁷ Las series anuales que están considerablemente incompletas se señalan con un asterisco.

⁸ El caudal de ese día, durante la estación seca en Belo Horizonte, no se debió a la lluvia, por lo que se considera que fue el resultado de algún fallo técnico.

⁹ Dado que el orden de magnitud comunicado por la estación de la PBH (>900 mm) no es correcto, se utilizó el registrado por la estación meteorológica del INMET.

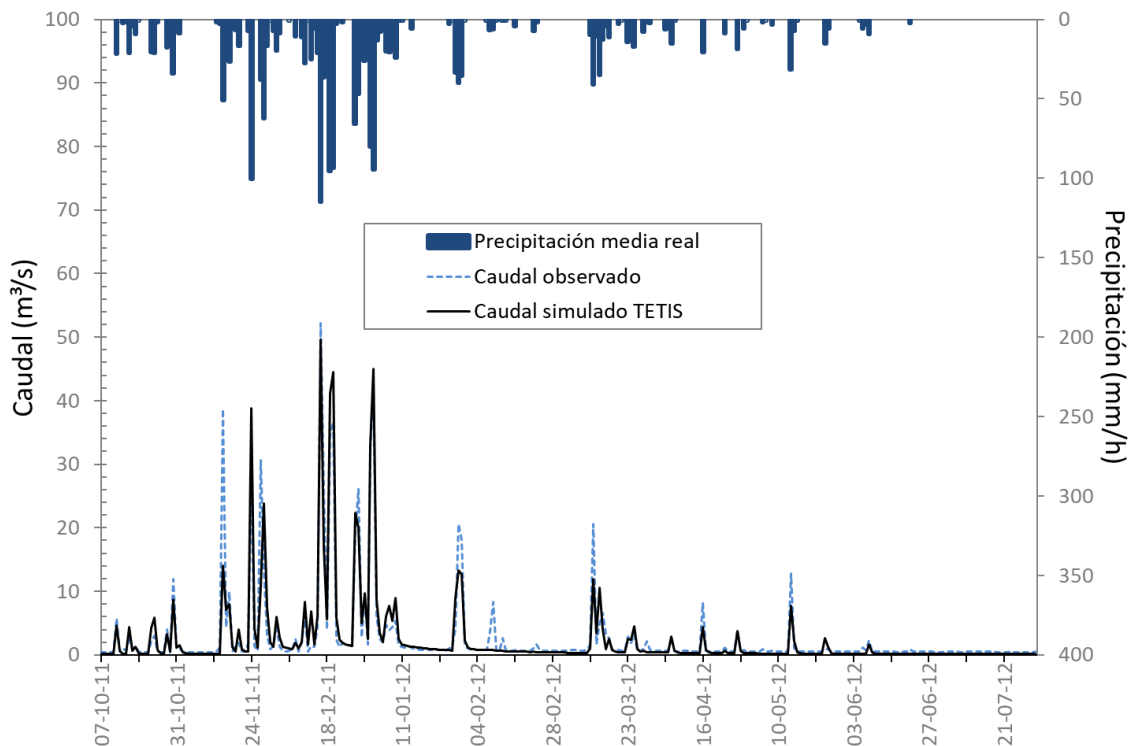
desempeño, se consideró como modelo aceptable a partir de índice de N&S mayor a 0,8 en calibración y a 0,5 en validación y error en volumen/tiempo al pico menor a 25% en calibración y 50% en validación, además de la representatividad de los procesos hidrológicos predominantes, control de balance hídrico y comportamiento temporal de flujos y almacenamientos a nivel superficial, subsuperficial y subterráneo. La tabla 7 muestra las principales métricas de cada proceso, calibración y validación, y los gráficos 15 y 16 muestran las comparaciones entre el caudal observado ($Q_{\text{observado}}$) y el simulado (Q_{simulado}) para cada uno, en el horizonte temporal para los períodos de referencia.

Tabla 7: Métricas de la calibración y validación del modelo

	Calibración	Validación
$Q_{\text{max observado}} (m^3/s)$	52,15	105,12
$Q_{\text{mas simulado}} (m^3/s)$	49,54	47,35
RMSE (m^3/s)	2,60	4,47
Error en tiempo al pico (días)	0,00	-9720,00
Error en volumen (%)	-7,04	-49,00
Índice N&S	0,85	0,57
RSR	0,39	0,65
Área (Km^2)	48,17	

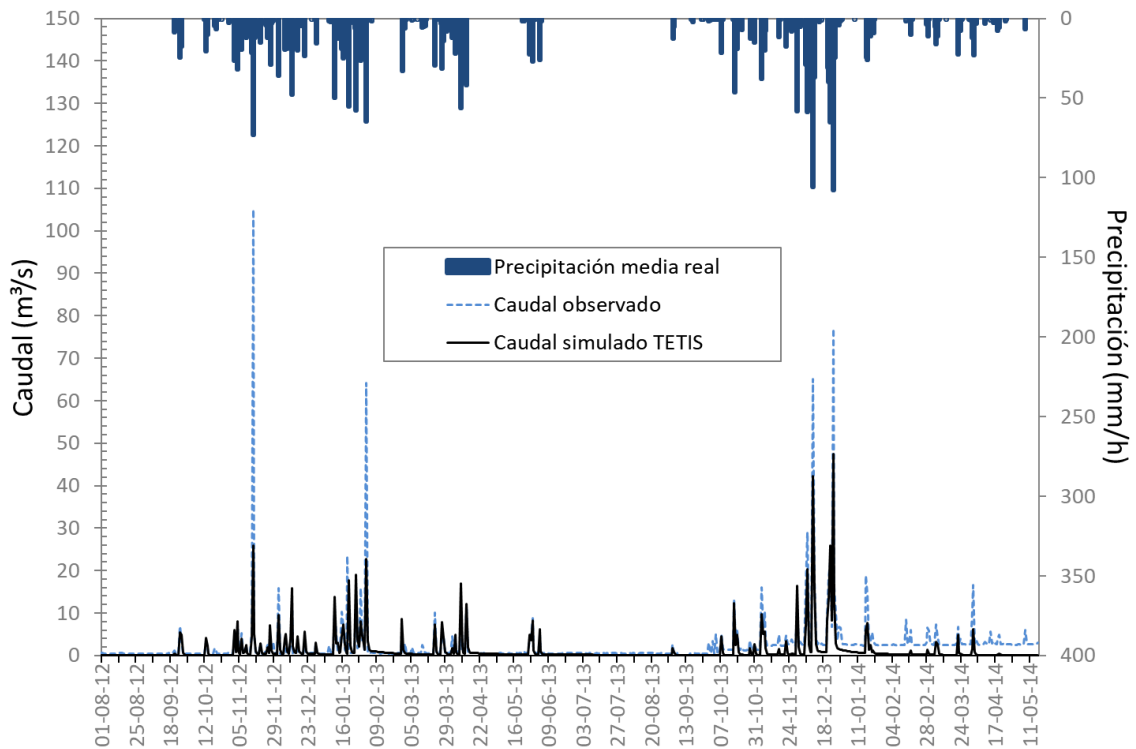
Fuente: Autoría propia

Gráfico 15: Comparativo $Q_{\text{observado}}$ y Q_{simulado} en el proceso de calibración



Fuente: Autoría propia

Gráfico 16: Comparativo Qobservado y Qsimulado en el proceso de validación



Fuente: Autoría propia

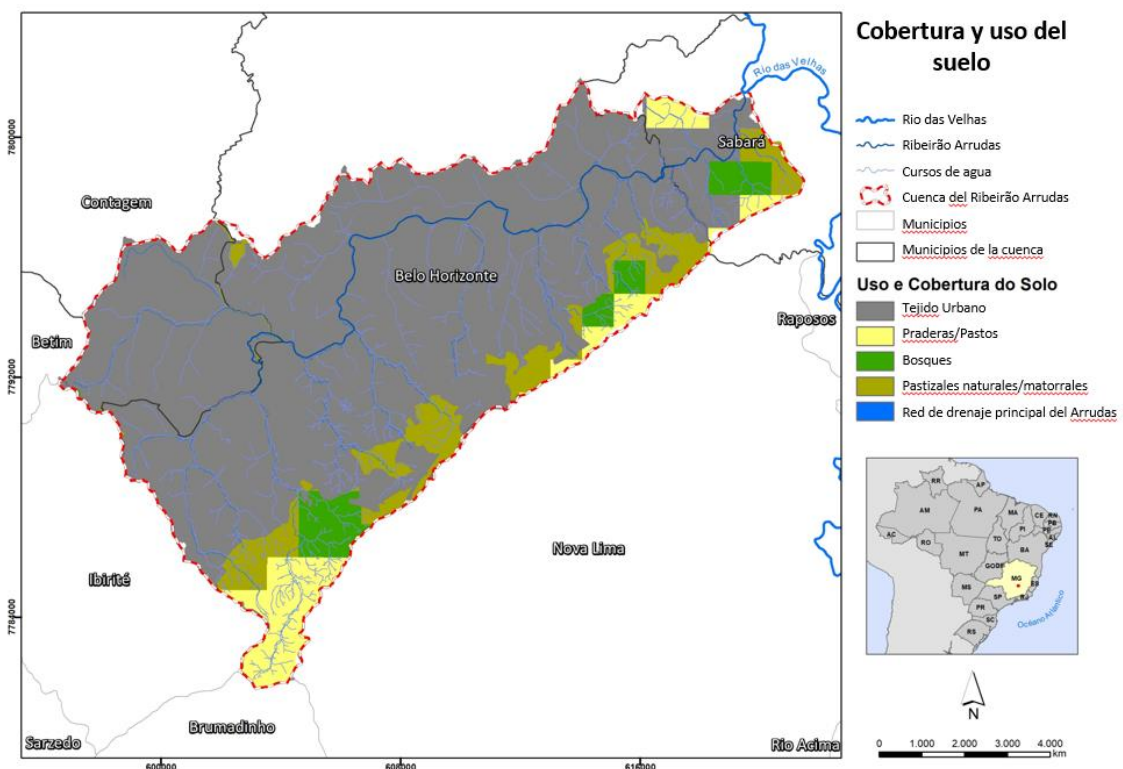
Analizando los gráficos, el modelo fue incapaz de reproducir el flujo base en el proceso de validación a partir de octubre de 2013, cuando los datos sufren un cambio representativo que se prolonga en el horizonte temporal. Sin embargo, el interés de este trabajo se centra en los caudales máximos, para los que, salvo los datos sobreestimados de acuerdo con la realidad del cauce, el modelo mostró una buena representatividad, con índices N&S de 0,86 y 0,54 para calibración y validación, respectivamente. En general, se observó que cuando los valores instantáneos de caudal están por encima de la capacidad del canal, por razones de desbordamiento o simplemente fallo de medición, el modelo es incapaz de alcanzar los mismos valores medios diarios observados como es de esperarse. Aparte de estos picos, donde la diferencia en el gráfico 18 es representativa, en general el caudal máximo simulado mostró una ligera subestimación, sin embargo, la reproducción de la dinámica de los caudales máximos a lo largo de la serie temporal ha sido adecuada a pesar de las fuentes de incertidumbre adyacentes a cualquier ejercicio de modelación hidrológica (datos de entrada, parámetros y estructura conceptual del modelo). En conclusión, el modelo es aceptable para la simulación del comportamiento hidrológico en los escenarios previstos en el presente trabajo.

5.2. Simulación del período de referencia

Para que los análisis aquí planteados sean realistas, es esencial que los escenarios que se comparen sigan metodologías de cálculo similares. Por este motivo, como ya se ha mencionado en este documento, se utilizó como periodo de referencia los datos modelizados por Ballarin *et al.* (2023) de 1980 a 2013, en lugar de los datos observados en INMET (2023) o PBH (2023a). Además, dado que dichos escenarios ya tienen corrección de sesgo para la cuenca del Ribeirão Arrudas, los mismos se consideran como el mejor producto disponible para el análisis en el presente estudio.

Para aislar el efecto del cambio del uso del suelo en la magnitud y frecuencia de las crecidas, se simuló el período de referencia de cambio climático con el mismo uso de suelo del año 2018 (FIG. 41). De esa manera se puede identificar el patrón de crecidas en dicho período de referencia el cual sirve para la comparación con los escenarios de cambio climático sin cambios en las coberturas y uso del suelo.

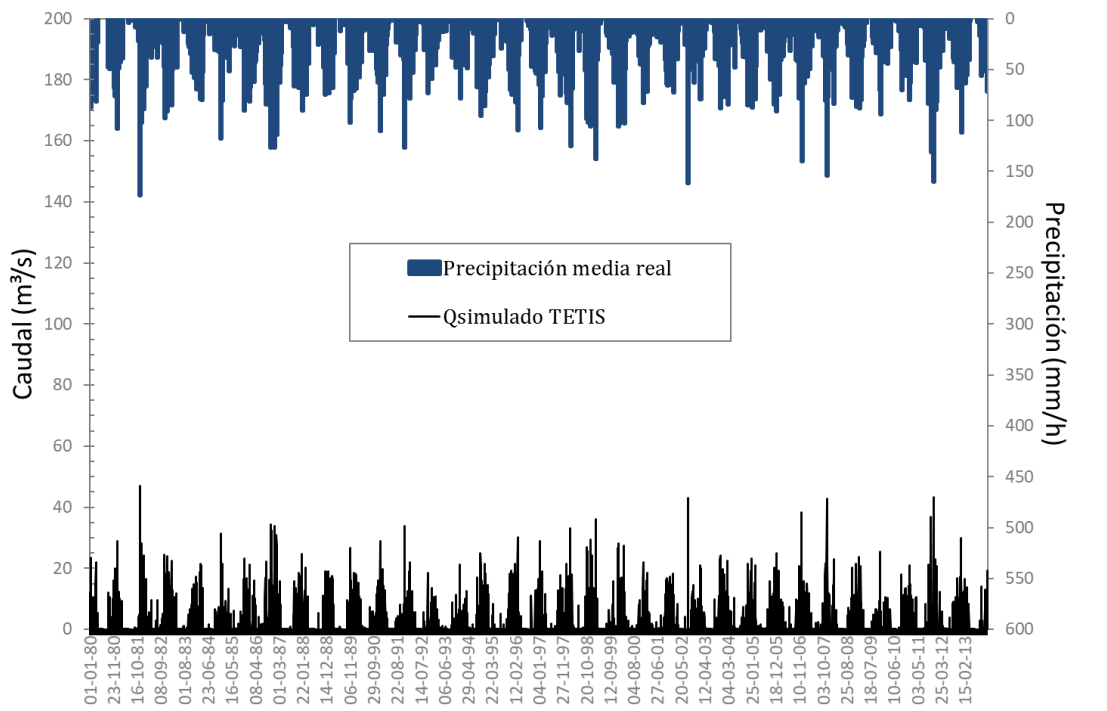
Figura 41: Cobertura y uso del suelo 2018



Fuente: Autoría propia

El gráfico 17 muestra cómo los volúmenes de precipitaciones modelizados en el periodo de referencia por Ballarin *et al.* (2023) se correlacionan con el caudal del ribeirão.

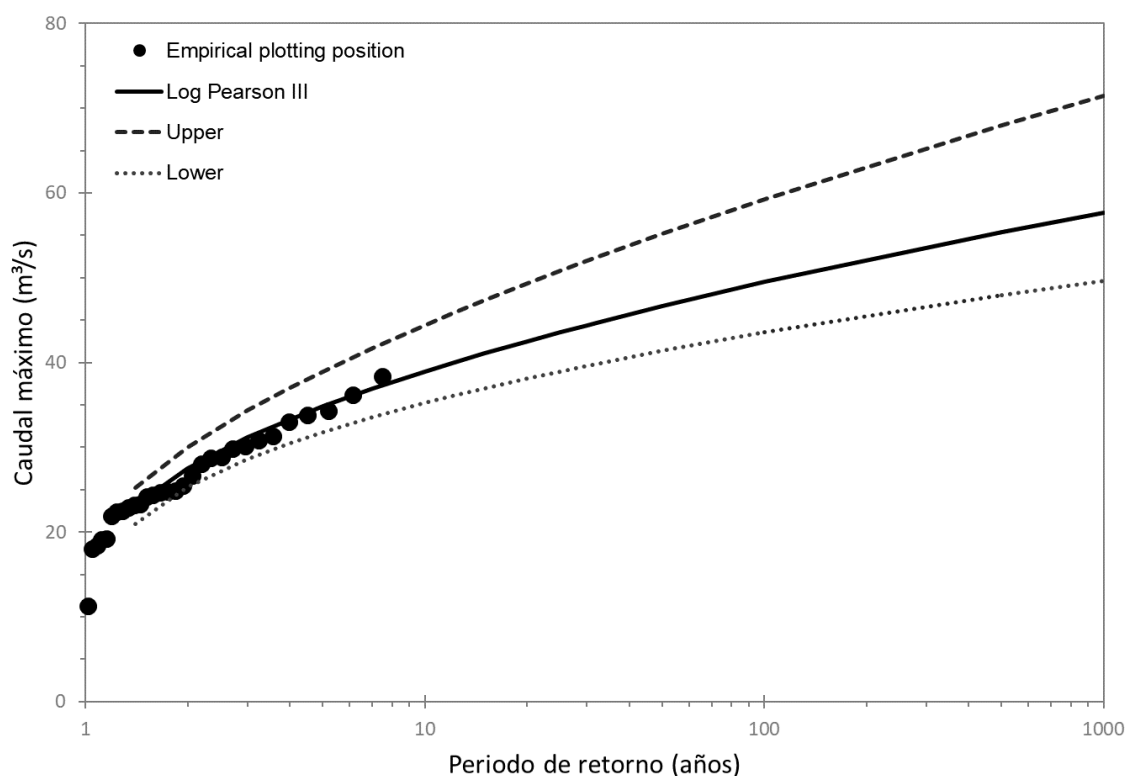
Gráfico 17: Hidrograma para el periodo de referencia 1980-2013



Fuente: Autoría propia

A partir de los resultados de la simulación del período de referencia, se ha estimado la función de distribución de probabilidad de las crecidas para dicho período utilizando uno de los modelos teóricos de mayor uso para ese tipo de datos extremos a nivel global: la función *log-Pearson Type III* (VALENTINI *et al.*, 2023; GALÁN *et al.* 2021; BALL, 2022). Para esa función se le estimaron las bandas de incertidumbre para un nivel de confianza del 90%, procedimiento estándar en este tipo de estudios en hidrología. Igualmente, para comprobar su validez, dicha función se ajusta adecuadamente a la distribución de función empírica utilizando una *plotting position* a partir de la fórmula general sugerida por Cunnane (1978) como se ve en el gráfico 18.

Gráfico 18: Función de distribución de probabilidad de las crecidas

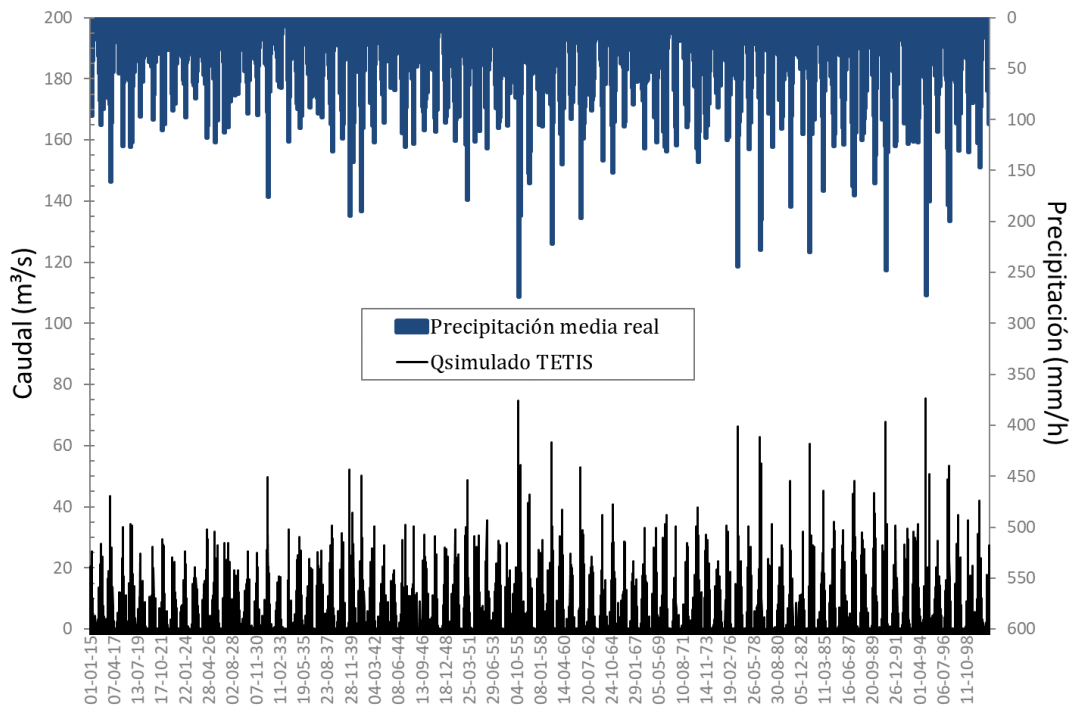


Fuente: Autoría propia

5.3. Simulación escenarios de cambio climático

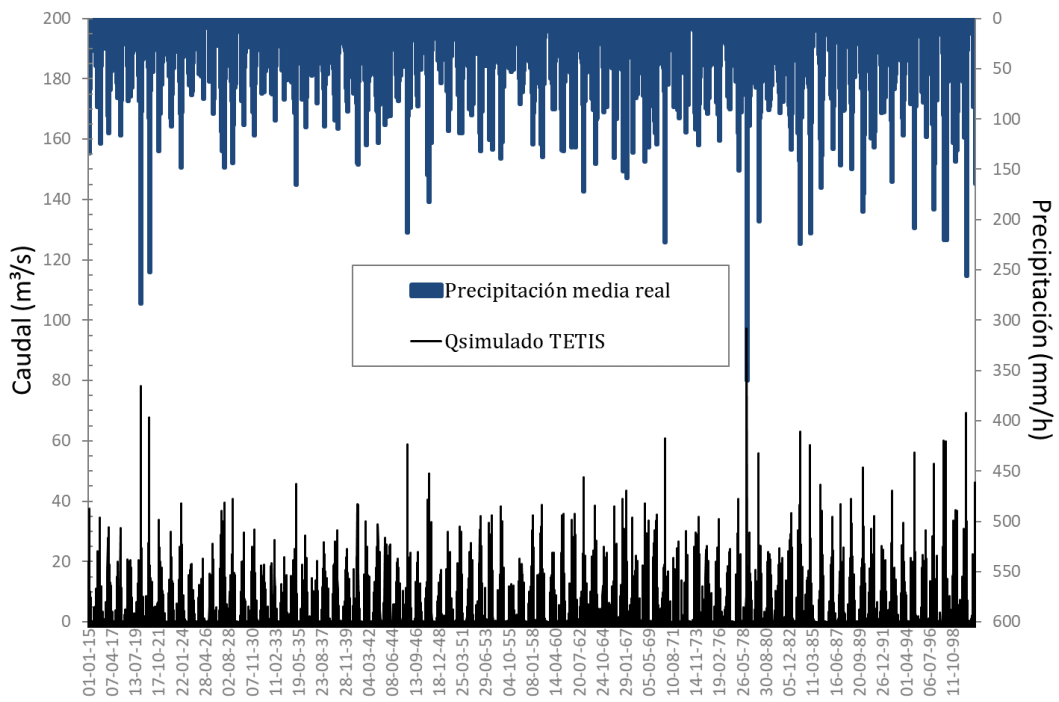
Como se mencionó anteriormente, las simulaciones de los dos escenarios de cambio climático (SSP2-4,5 y SSP5-8,5) se realizaron utilizando datos climáticos de la misma base de datos, de Ballarin *et al.* (2023), utilizada para el periodo de referencia para el uso y cobertura del suelo de 2018 (FIG. 41). De esa manera se pueden ver los cambios en el patrón de crecidas producidos exclusivamente por efecto de los escenarios de cambio climático. Los gráficos 19 y 20 muestran los hidrogramas para cada uno de esos escenarios aquí considerados, respectivamente. Se puede observar que el escenario SSP5-8,5, comparado con el SSP2-4,5, presenta precipitaciones más intensas, lo que también se traduce en crecidas más intensas.

Gráfico 19: Hidrograma escenario SSP2-4,5 para 2015-2100



Fuente: Autoría propia

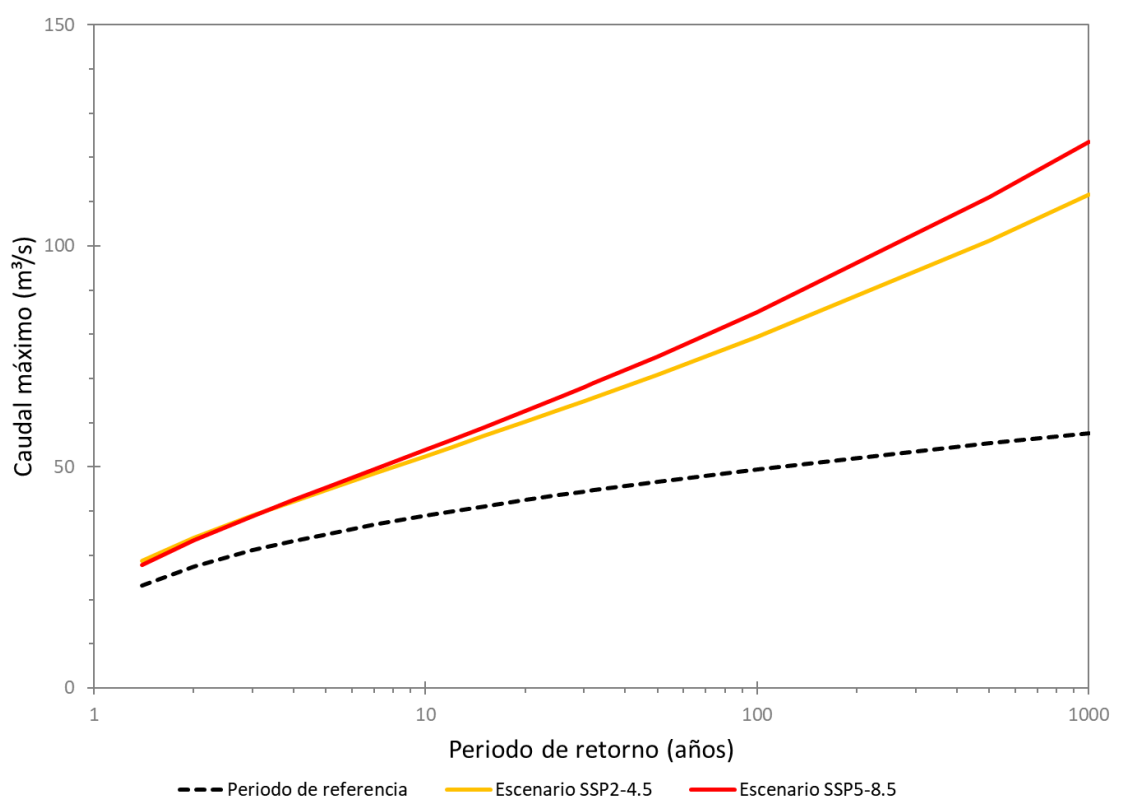
Gráfico 20: Hidrograma escenario SSP5-8,5 para 2015-2100



Fuente: Autoría propia

En el gráfico 21 se presentan los resultados comparativos del comportamiento de las crecidas para el período de referencia y los dos escenarios de cambio climático considerados. En ambos casos, SSP2-4,5 y SSP5-8,5, se aprecia que es esperable que la magnitud de las crecidas incremente con el cambio climático, con respecto al periodo de referencia.

Gráfico 21: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia, los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5



Fuente: Autoría propia

Los datos del gráfico 21 son muy relevantes si consideramos que los caudales de diseño considerados en las infraestructuras de micro y macrodrenaje urbano suelen tener en cuenta datos históricos sin considerar las variaciones futuras esperadas en los parámetros climáticos y, en consecuencia, en los caudales. Por lo tanto, cabe prever que, a medida que pasen los años y se agrave el cambio climático y aumente la incidencia de los fenómenos pluviométricos extremos, las estructuras de drenaje urbano ya existentes se infravalorarán. Con eso, se aumenta el riesgo de pérdidas materiales e inmateriales en los centros urbanos porque emergerán nuevos episodios de inundaciones urbanas por obsolescencia de la red de drenaje pluvial.

Además, se observa una tendencia a la ampliación de la diferencia de magnitud entre los tres escenarios considerados, especialmente para periodos de retorno superiores a 10 años. Con excepción de los TR inferiores a 5 años, las previsiones de caudal son más elevadas para el escenario SSP5-8,5, considerado más extremo, que para el escenario SSP2-4,5, que sería una trayectoria intermedia. En la tabla 8, se puede ver la comparación porcentual de los caudales máximos entre los tres escenarios para diferentes periodos de retorno.

Tabla 8: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con respecto al periodo de referencia por periodo de retorno

TR	QPR	QSSP2-4,5	QSSP5-8,5	SSP2/PR	SSP5/PR	SSP5/SSP2
1	23,3	28,9	28,1	124%	120%	97%
2	27,7	34,1	33,7	123%	122%	99%
3	31,3	39,1	39,1	125%	125%	100%
4	33,5	42,4	42,7	127%	128%	101%
5	35,0	44,9	45,5	128%	130%	101%
7	37,1	48,7	49,6	131%	134%	102%
10	39,2	52,6	54,0	134%	138%	103%
12	40,2	54,7	56,3	136%	140%	103%
15	41,3	57,1	59,1	138%	143%	103%
20	42,8	60,4	62,8	141%	147%	104%
25	43,8	62,9	65,8	144%	150%	104%
30	44,7	65,1	68,2	146%	153%	105%
32	45,0	65,8	69,0	146%	153%	105%
50	47,0	71,1	75,2	151%	160%	106%
100	49,9	79,6	85,2	160%	171%	107%
500	55,9	101,5	111,2	182%	199%	110%
1000	58,3	111,9	123,8	192%	213%	111%

Fuente: Autoría propia

5.4. Simulación escenarios de cambio climático con SbN como estrategias de adaptación

Teniendo en cuenta todos los antecedentes teóricos ya presentados en este estudio, y las proyecciones simuladas en el tópico anterior, la necesidad de adaptar el territorio se hace casi imprescindible. Por este motivo, la última simulación propone cambios en el tejido urbano con la implantación de SbN, más concretamente cubiertas verdes (CV) y jardines de lluvia (JL).

Las cubiertas verdes se incorporaron a partir de las bases de datos de edificaciones de Belo Horizonte (BH), facilitados por PBH (2023), y Contagem (C),

facilitados por *Prefeitura de Contagem* (2023), para áreas mayores o iguales a 485,91 m², es decir, el potencial de cubiertas por encima de la mediana de las áreas posible de incorporarse en TETIS (celdas con resolución mínima de 12,5 x 12,5 m) (más detalles en la metodología). Con este filtro, se quedaron 11.072 superficies de las 22.143 con áreas mayores a los valores mínimos de la celda (156,25 m²) (TAB. 9). Como ya se mencionó, no fue posible obtener el mismo tipo de base para el municipio de Sabará, pero esto no es tan relevante a nivel de simulación considerando que la parte de la cuenca que se encuentra en este municipio tiene una baja densidad urbana, además porque las comparaciones de efectividad de las medidas sobre el caudal máximo se realizaron hasta justo la finalización del núcleo urbano de Belo Horizonte.

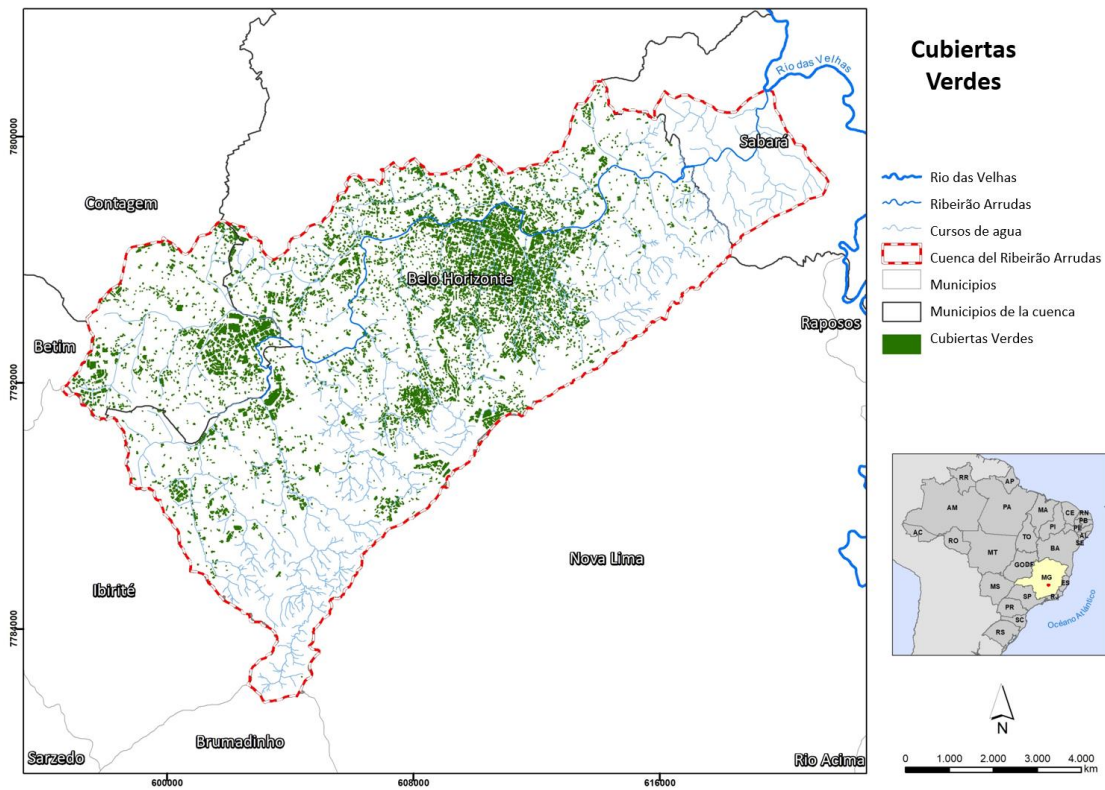
Tabla 9: Límites de filtrado, con sus respectivas superficies y número de polígonos, utilizados en la muestra de cubiertas verdes en la cuenca del Ribeirão Arrudas

	LÍMITE INFERIOR ÁREA	ÁREA TOTAL	Nº DE POLÍGONOS
EDIFICACIONES ORIGINAL	-	4.518.568.286,5 m ²	477.306
EDIFICACIONES APTAS	156,25 m ²	16.113.756,8 m ²	22.143
EDIFICACIONES SIMULADAS	485,91 m ²	11.702.542,6 m ²	11.072

Fuente: Autoría propia

La figura 42 muestra la distribución espacial de las cubiertas verdes propuestas a lo largo de la cuenca del Ribeirão Arrudas. Se puede observar que existe una mayor concentración en la región centro-sur del municipio de Belo Horizonte, que es una de las regiones de la cuenca más frecuentemente afectada por episodios de inundaciones, y en la región de Cidade Industrial, en Contagem, donde el tejido urbano está ocupado básicamente por grandes empresas.

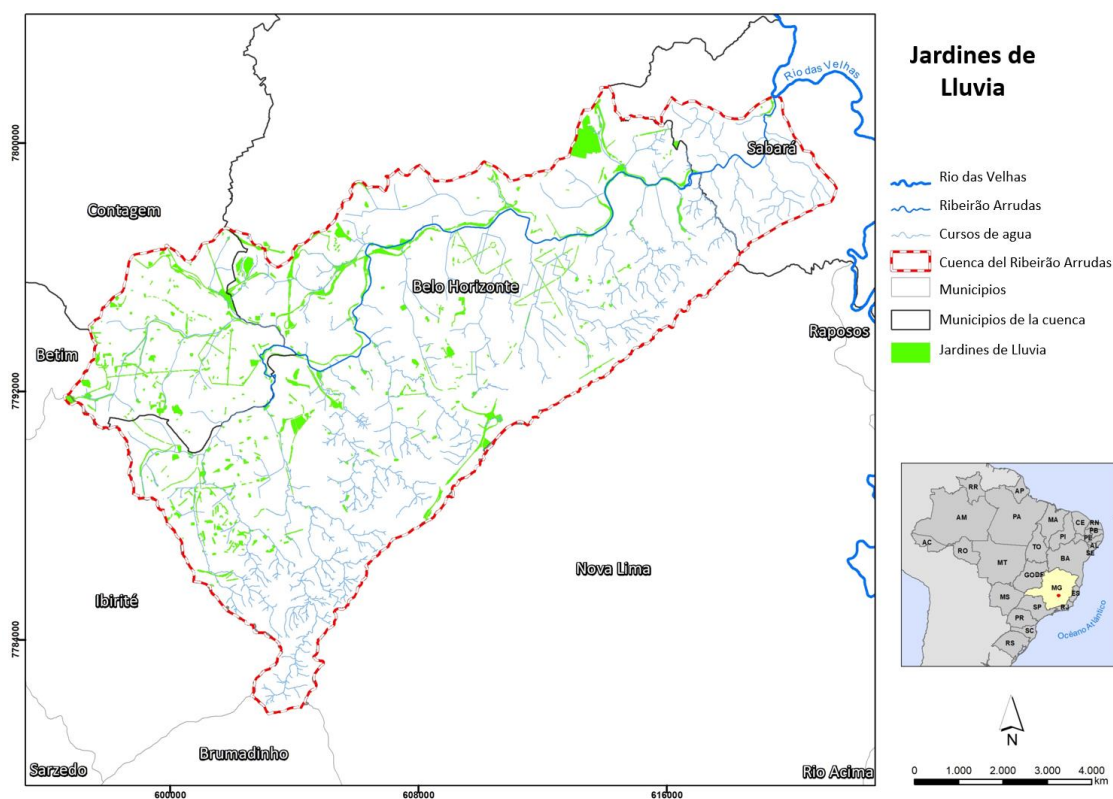
Figura 42: Distribución espacial de las cubiertas verdes planteadas



Fuente: Autoría propia

La figura 43 muestra los polígonos dibujados como propuesta de inclusión de jardines de lluvia, que varían en tamaño y geometría a lo largo de la cuenca (más detalles en la metodología). Los dibujos se hicieron como una propuesta para crear una red de elementos espaciados, pero conectados por el territorio, lo que lleva al potencial aumento de su eficacia.

Figura 43: Distribución espacial de los jardines de lluvia planteados



Fuente: Autoría propia

Sin embargo, a efectos de la simulación, también sólo se consideraron los polígonos mayores de 156,25 m². La diferencia entre área y número de polígonos considerados en el mapeado y lo que fue de hecho simulado está en la tabla 10.

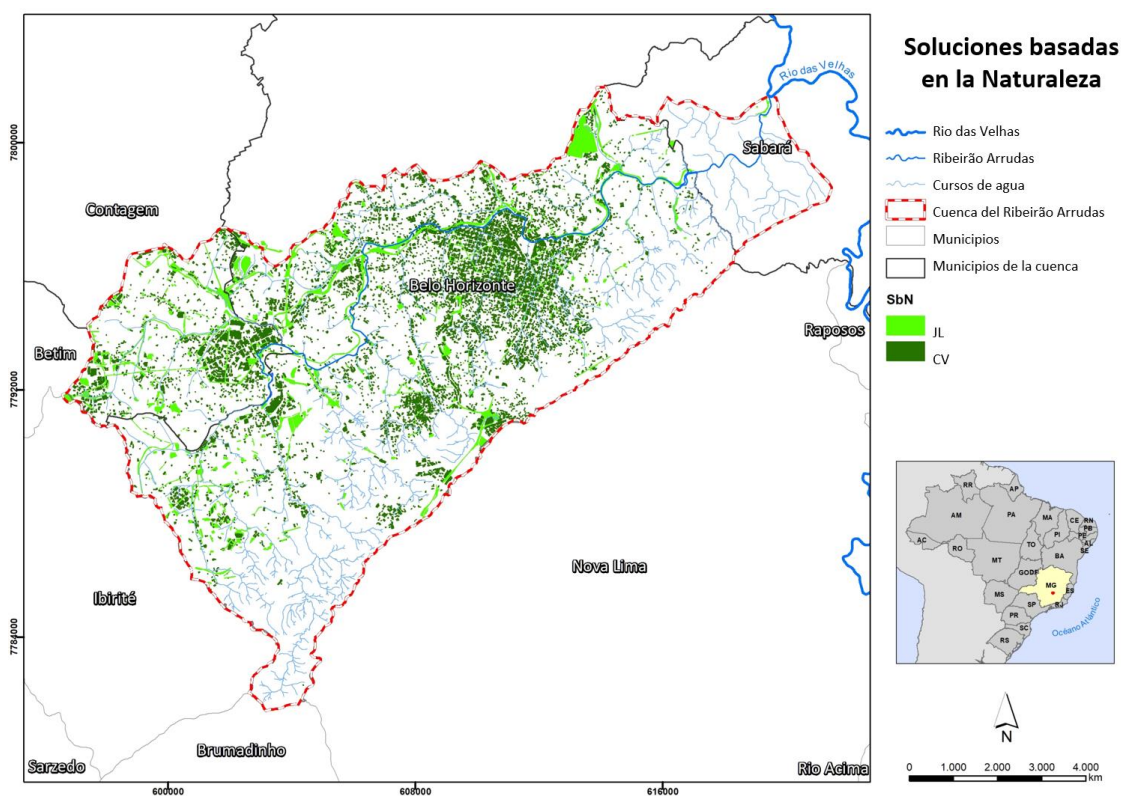
Tabla 10: Comparación jardines de lluvia mapeados y simulados

	ÁREA TOTAL	Nº DE POLÍGONOS
JL MAPEADO	5.203.860 m ²	1.601
JL SIMULADO	5.189.184 m ²	1.429
SIMULADO/MAPEADO	99,7%	89,3%

Fuente: Autoría propia

Por lo tanto, no se considera que hubo una reducción tan significativa entre mapeado y simulado, principalmente considerando el área total. También cabe señalar que los jardines de lluvia muy pequeños pueden tener poca influencia en el control del drenaje debido a su bajo potencial de almacenamiento de agua de lluvia. Por último, la figura 44 muestra la distribución de las SBN propuestas con la combinación de cubiertas verdes y jardines de lluvia. El número total de polígonos y sus respectivas áreas totales simuladas se muestran en la tabla 11.

Figura 44: Distribución espacial de las SbN planteadas



Fuente: Autoría propia

Tabla 11: Área y número de polígonos de la implementación de SbN propuesta

	ÁREA TOTAL	Nº DE POLÍGONOS
CV	11.702.542,6 m ²	11.072
JL	5.189.184,2 m ²	1.429
CV + JL	16.891.726,8 m ²	12.501

Fuente: Autoría propia

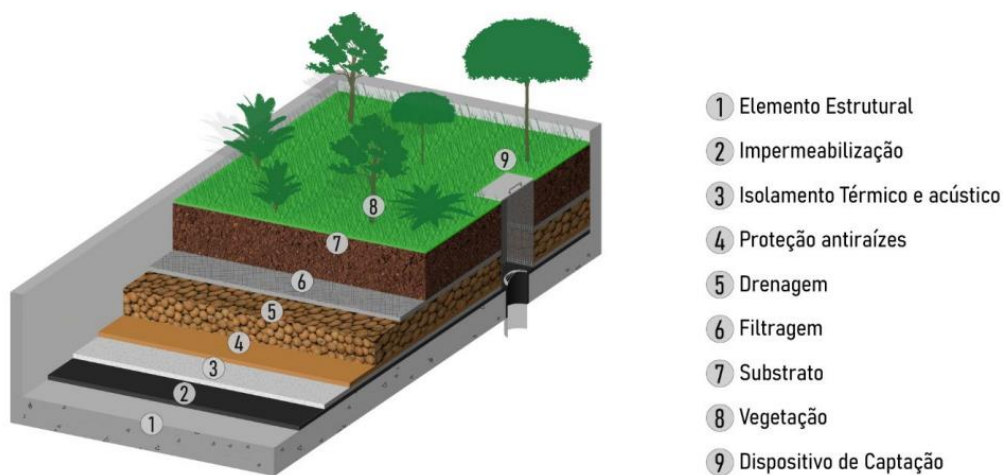
El gran número de intervenciones propuestas, junto con su amplia distribución, pretende mostrar los beneficios de las SbN como infraestructura descentralizada para el territorio manteniendo cierto grado de realismo (e.g. plantear poner al 100% o incluso el percentil 75% del total de cubiertas del área urbana podría ser inviable desde el punto de financiación, implementación y manejo). En total, se han propuesto intervenciones en cerca del 7% de la superficie de la cuenca del Ribeirão Arrudas.

Tanto para las cubiertas verdes como para los jardines de lluvia se ha utilizado la profundidad encontrada en PBH (2022a) para modificar el mapa de almacenamiento estático del suelo del modelo TETIS considerando el modelo con coberturas y usos del suelo más actual, de 2018. Con eso, es posible ser lo más realista posible en el análisis

de la efectividad de las medidas comparando el escenario actual respecto a no hacer nada de adaptación al cambio climático – cobertura del suelo de 2018 + Escenarios de cambio climático, escenario “*business as usual*” - y con respecto a medidas de adaptación introduciendo SbN - cobertura del suelo de 2018 ajustado con SbN + escenarios de cambio climático. La hipótesis a considerar es que el agua que entra en la medida no retorna a la red de drenaje, sino que se evapotranspira y/o se conduce para un reuso (e.g. jardinería, baños, etc.).

Para las cubiertas verdes, se utilizó una profundidad media utilizada para las cubiertas consideradas como típicas desde el manual de PBH (2022a), que puede ser visto en la figura 45. De los elementos que componen esta medida, los elementos 5 y 7 son los más susceptibles a la acumulación de agua. Según el manual, la capa de drenaje (elemento 5) tiene una profundidad media de entre 7 y 10 cm y un porcentaje mínimo de huecos del 25%. La capa de subrasante (elemento 7) debe tener una profundidad mínima de 20 cm y un porcentaje de huecos del 15%. Por razones de simplificación operativa, se adoptaron dos supuestos aproximados para compensar, por ejemplo, el hecho de que no es posible incluir un porcentaje de huecos en el modelo TETIS. Para la capa de drenaje, se consideró el valor superior de 10 cm de profundidad como forma de compensar el hecho de que no se dispone de la profundidad de la capa 6 que figura en el dibujo esquemático. Para el sustrato, se consideró el límite inferior de la profundidad sugerida (20 cm). Para ambas capas, se supuso que todo el volumen podía llenarse con agua, es decir, funcionan como reservorios con profundidad total de 30 cm (PBH 2022a).

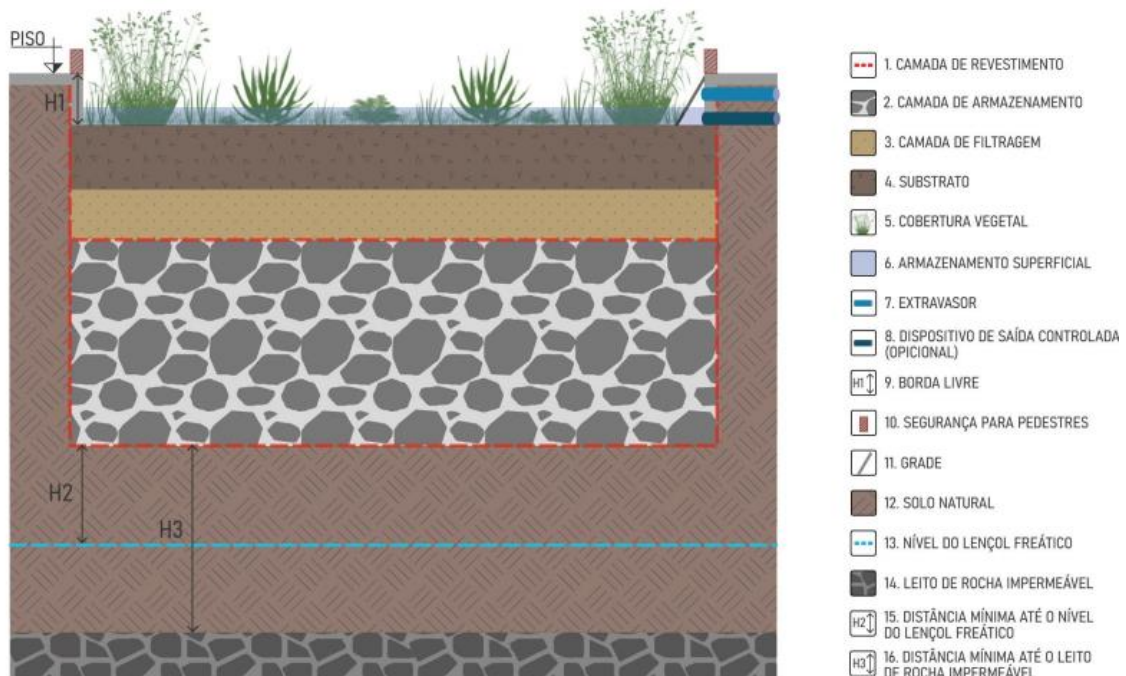
Figura 45: Configuración de cubierta verde considerada



Fuente: PBH (2022a)

Para la inclusión de los jardines de lluvia, también se utilizaron las dimensiones propuestas para las configuraciones típicas de esta medida en PBH (2022a) (FIG. 46). De los elementos que componen esta medida, los elementos 2, 4 y 5/6 acumulan agua. La capa de almacenamiento (elemento 2) debe ser muy porosa y tener al menos 30 cm de profundidad. La capa de sustrato (elemento 4) debe tener al menos 23 cm de profundidad y un 15% de huecos. Por último, la capa de almacenamiento superficial (elemento 6) que se produce sobre la capa de vegetación (elemento 5) debe tener una profundidad máxima de agua de 15 cm. Esto se debe a que, a pesar de su función de almacenamiento, la capa freática no debe ser demasiado profunda para no perjudicar el crecimiento de las plantas, poner en peligro la seguridad o crear condiciones de estancamiento del agua (PBH, 2022a). También para simplificar, siguiendo la misma lógica anterior, se consideraron los valores mínimos de profundidad de las capas 2 y 4, pero con la posibilidad de una saturación del 100%. Por lo tanto, se considera la profundidad de 53 cm más 15 cm de profundidad del agua, lo que da como resultado una profundidad total de 68 cm en los jardines de lluvia.

Figura 46: Configuración de jardín de lluvia considerada

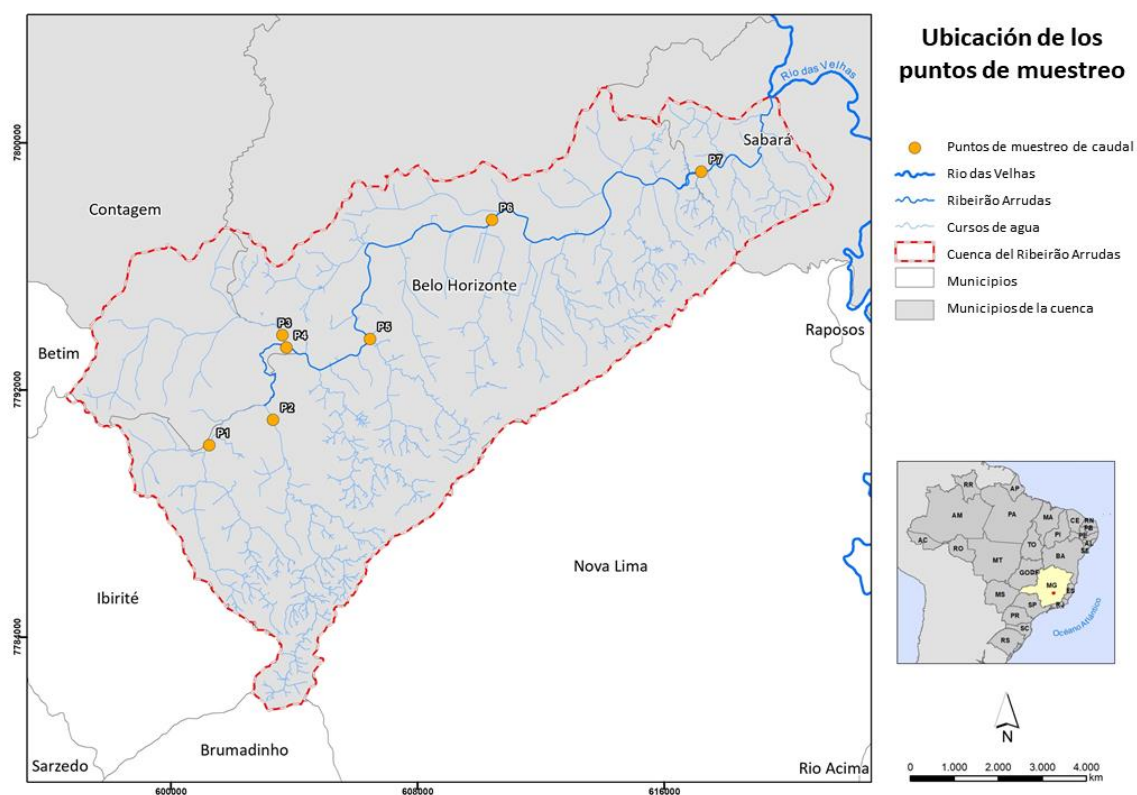


Fuente: PBH (2022a)

Con la cubierta y el uso del suelo modificados en el modelo TETIS, comparado a la cobertura y uso del suelo de 2018, se espera ganar en resiliencia frente a las

inundaciones vía reducción de los caudales máximos circulantes en la red de drenaje. Para comparar los efectos de las SbN en diferentes puntos de la cuenca, con sus respectivas áreas de contribución, se simularon los caudales máximos para siete puntos: Córrego Jatobá (P1); Córrego do Barreiro (P2); un punto justo antes de la confluencia con el *ribeirão* en el Córrego Água Branca (P3); la estación fluviométrica 24 situada en el lecho del Ribeirão Arrudas (P4); un punto justo antes de la confluencia con el *ribeirão* en el Córrego do Cercadinho (P5); Córrego do Leitão (P6); y un punto al final del municipio de Belo Horizonte en el Arrudas (P7). Estos puntos fueron elegidos estratégicamente en función de diferentes criterios. Uno de ellos fue la proximidad a las zonas inundables cartografiadas por el ayuntamiento (que pueden ser vistas en la figura 11). Además, se eligieron puntos en las partes alta, media y baja de la cuenca y en subcuencas que ya cuentan con estudios similares para que los resultados pudieran compararse. La figura 47 muestra la ubicación de cada punto en la cuenca. La tabla 12 muestra las coordenadas respectivas.

Figura 47: Distribución de los puntos de muestreo en la cuenca



Fuente: Autoría propia

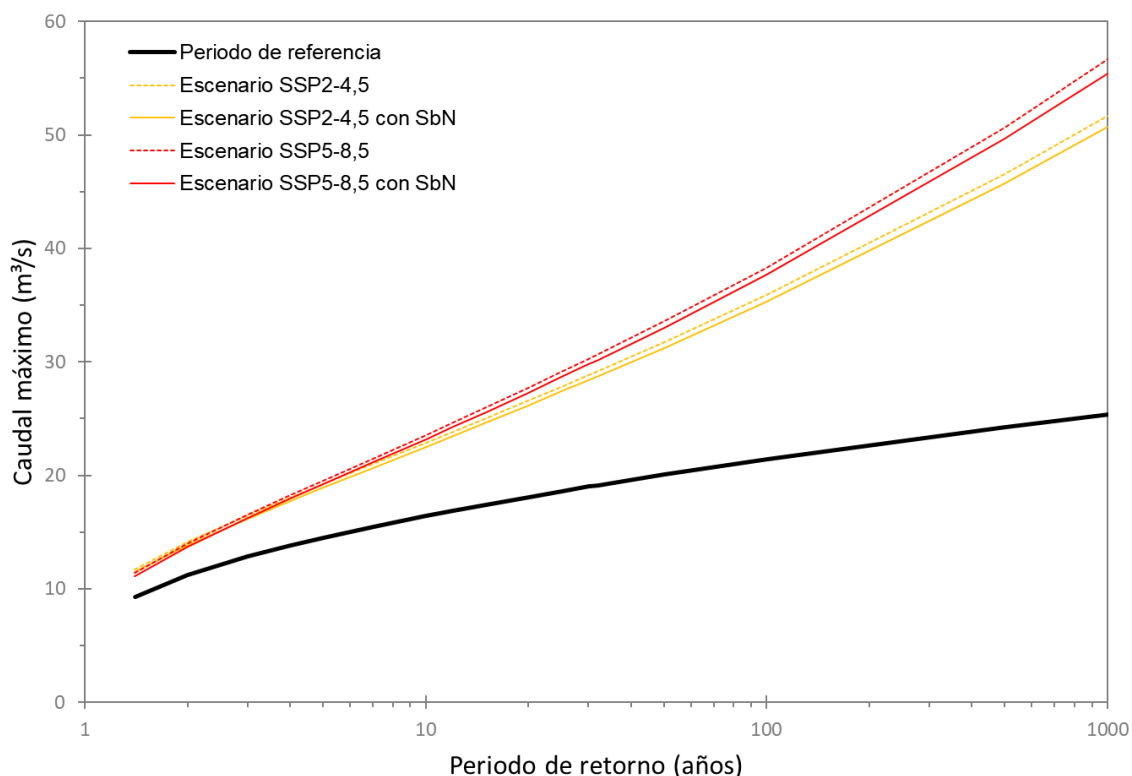
Tabla 12: Coordenadas de los puntos de muestreo

UBICACIÓN		X	Y
P1	Córrego do Jatobá	601242	7790196
P2	Córrego do Barreiro	603310	7791025
P3	Córrego Água Branca (confluência con Rib. Arrudas)	603623	7793763
P4	Ribeirão Arrudas (aguas arriba)	603747	7793363
P5	Córrego do Cercadinho (confluencia con Rib. Arrudas)	606454	7793643
P6	Córrego do Leitão	610412	7797498
P7	Ribeirão Arrudas (aguas abajo)	617198	7799064

Fuente: Autoría propia

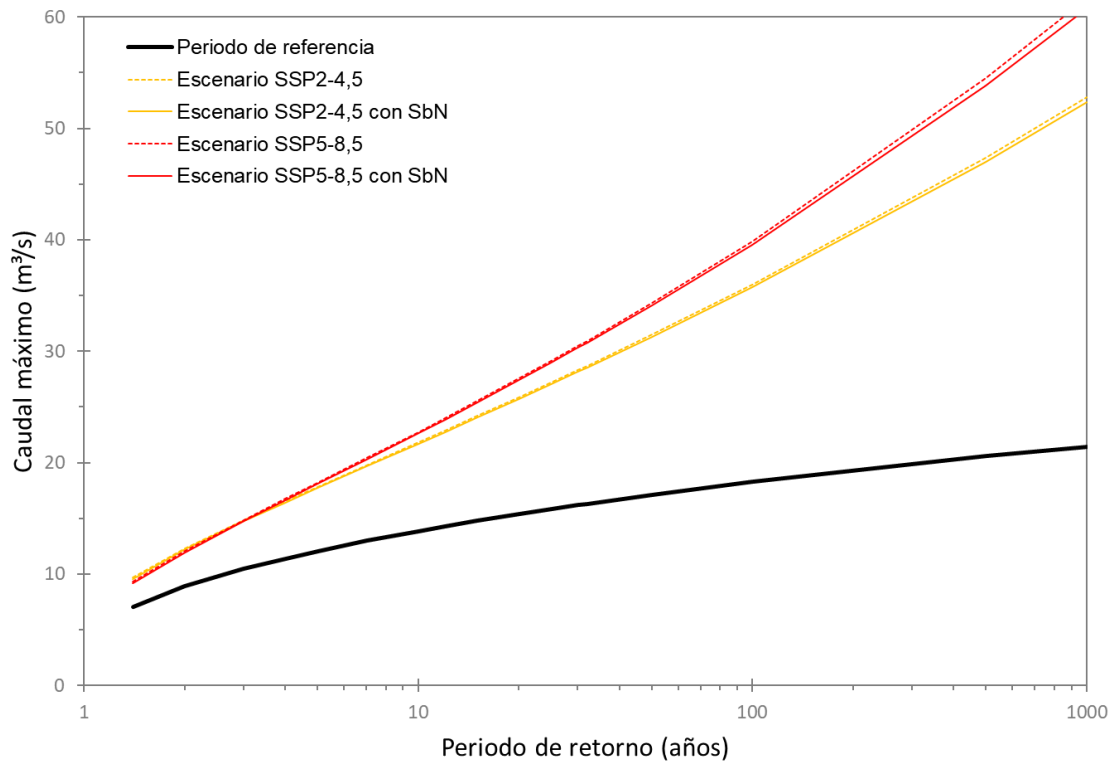
Una vez seleccionados los puntos, y con la parametrización del modelo planteada con las SbN para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, se simularon los caudales máximos en TETIS para la obtención de los periodos de retorno en cada uno de ellos a partir de la aplicación de la función de probabilidad teórica seleccionada (Log-Pearson III). Dichos resultados se han comparado con los obtenidos para la cubierta del suelo de 2018 (FIG. 41) y período de control de referencia. Los resultados se muestran en los gráficos 22 a 28.

Gráfico 22: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P1)



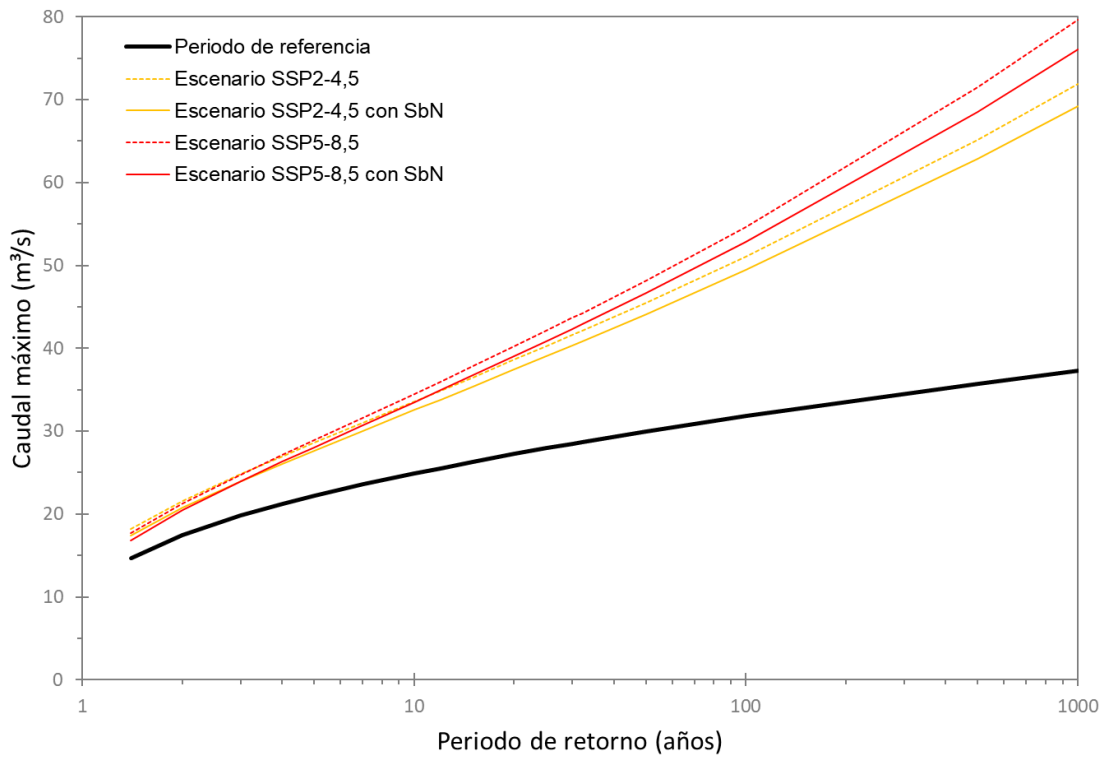
Fuente: Autoría propia

Gráfico 23: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P2)



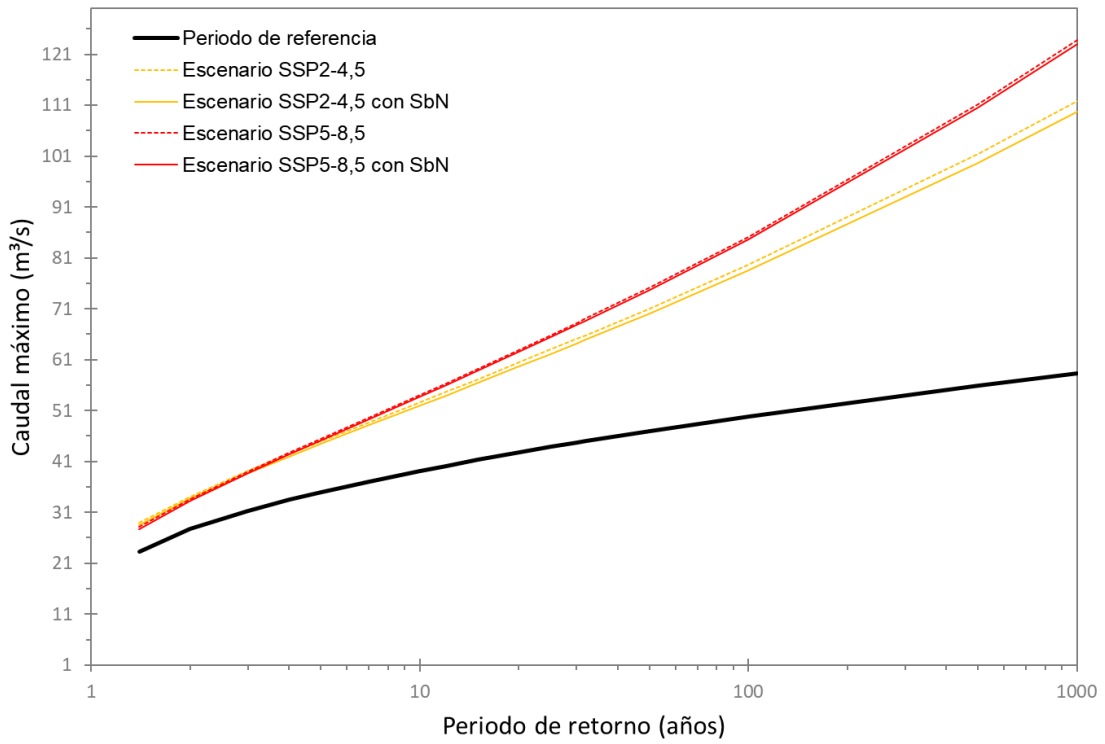
Fuente: Autoría propia

Gráfico 24: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P3)



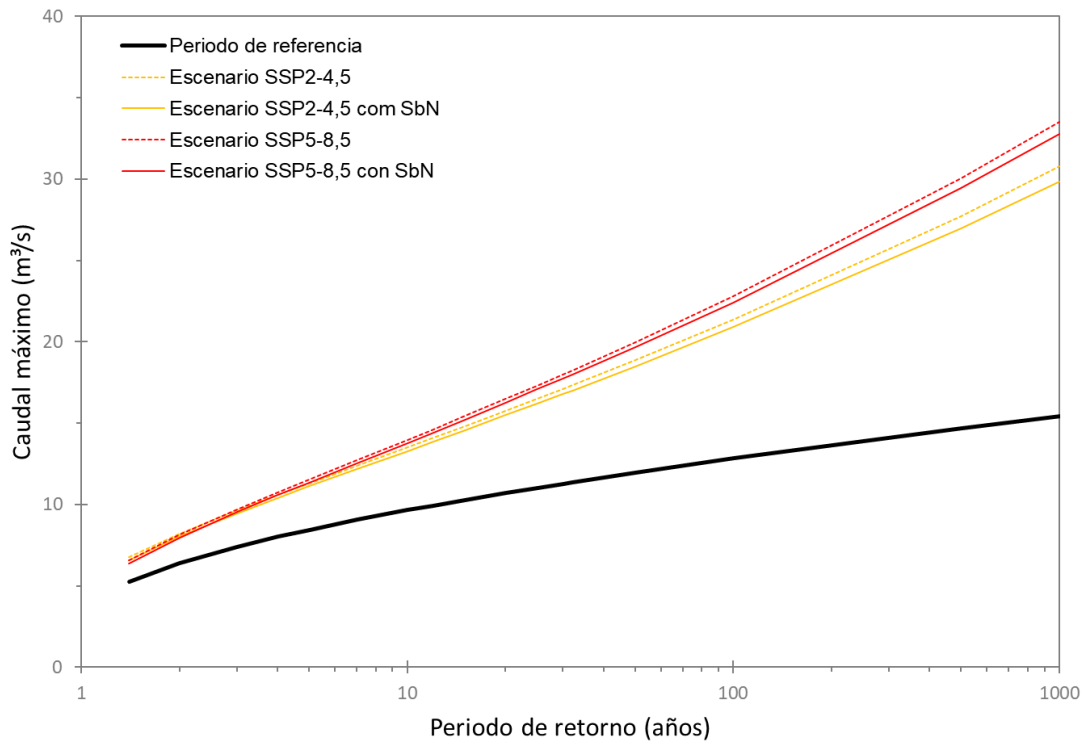
Fuente: Autoría propia

Gráfico 25: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P4)



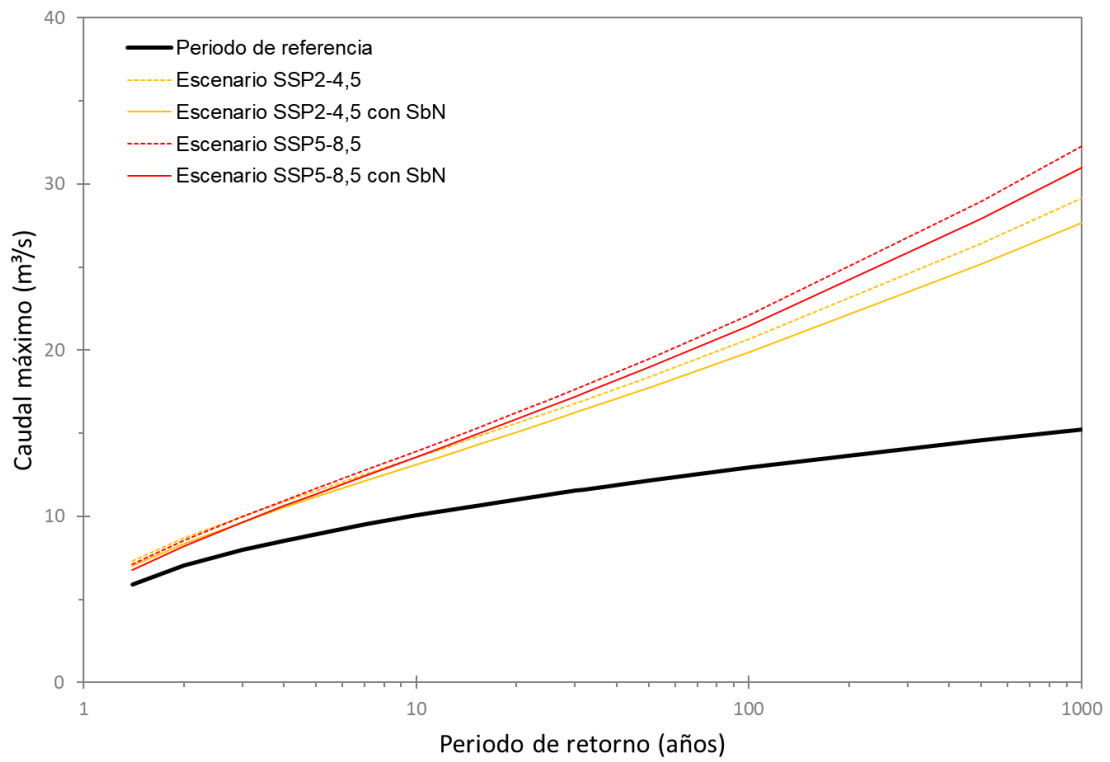
Fuente: Autoría propia

Gráfico 26: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P5)



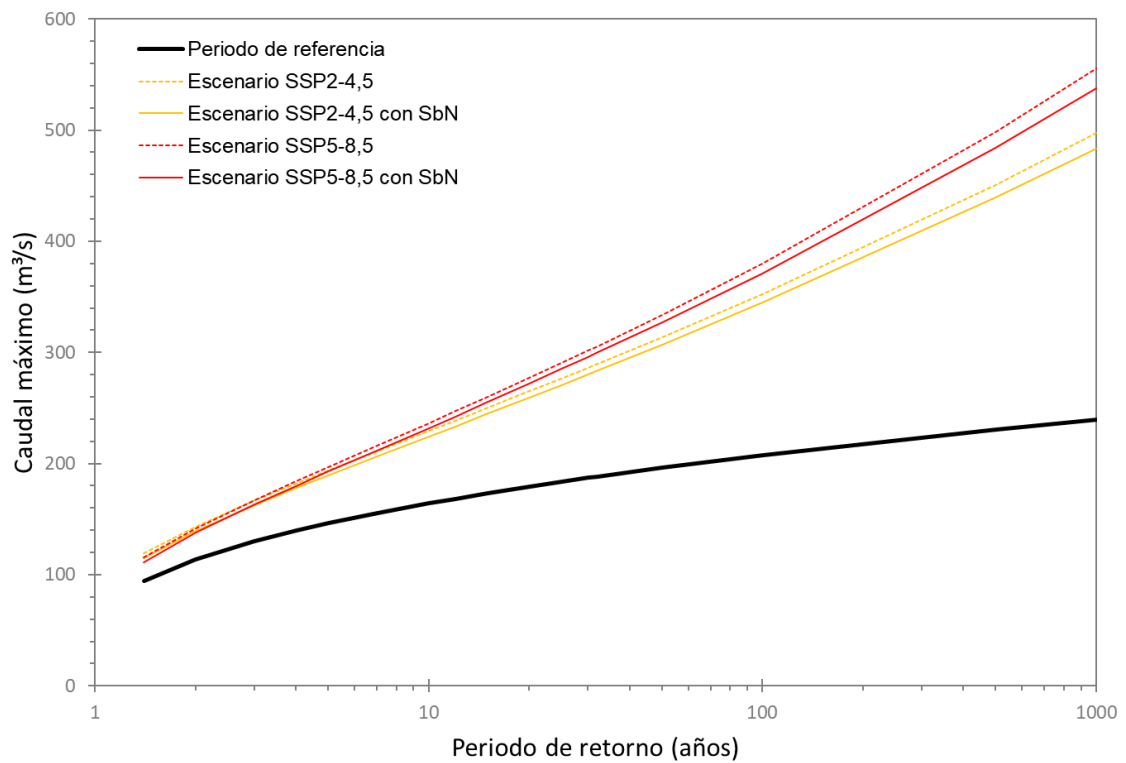
Fuente: Autoría propia

Gráfico 27: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P6)



Fuente: Autoría propia

Gráfico 28: Caudales máximos según el periodo de retorno para el periodo de referencia y para los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5, con y sin SbN (P7)



Fuente: Autoría propia

Además de los gráficos, se elaboraron las tablas 13 a 19 con las variaciones porcentuales entre los resultados de cada uno de los puntos seleccionados.

Tabla 13: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P1)

	REF	SSP2-4,5	SSP5-8,5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	94,4	119,1	115,5	115,2	111,4	3,3%	3,6%
2	114,0	143,5	141,6	139,6	137,7	2,7%	2,7%
3	130,1	166,7	166,8	162,7	163,0	2,4%	2,3%
4	139,6	182,1	183,7	178,0	179,9	2,3%	2,1%
5	146,2	193,7	196,6	189,5	192,7	2,2%	2,0%
7	155,4	211,0	215,9	206,5	211,8	2,1%	1,9%
10	164,1	229,2	236,4	224,4	232,0	2,1%	1,9%
12	168,3	238,5	247,0	233,6	242,4	2,1%	1,8%
15	173,2	250,0	260,1	244,8	255,3	2,1%	1,8%
20	179,2	264,9	277,2	259,4	272,0	2,1%	1,9%
25	183,7	276,6	290,6	270,8	285,1	2,1%	1,9%
30	187,2	286,2	301,8	280,2	296,0	2,1%	1,9%
32	188,4	289,6	305,8	283,6	299,9	2,1%	1,9%
50	196,4	313,7	333,9	307,0	327,1	2,1%	2,0%
100	207,9	352,6	379,8	344,6	371,2	2,3%	2,2%
500	230,9	450,9	498,2	439,1	483,8	2,6%	2,9%
1000	239,6	497,4	555,3	483,4	537,4	2,8%	3,2%

Fuente: Autoría propia

Tabla 14: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P2)

	REF	SSP2-4,5	SSP5-8,5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	7,0	9,7	9,3	9,6	9,2	1,2%	1,4%
2	8,9	12,3	12,1	12,2	12,0	0,9%	1,0%
3	10,5	14,8	14,8	14,7	14,7	0,8%	0,7%
4	11,4	16,5	16,7	16,4	16,6	0,7%	0,6%
5	12,1	17,8	18,2	17,7	18,1	0,7%	0,5%
7	13,0	19,8	20,4	19,7	20,3	0,6%	0,5%
10	13,9	21,8	22,8	21,7	22,7	0,6%	0,5%
12	14,3	22,9	24,0	22,8	23,9	0,6%	0,5%
15	14,8	24,2	25,5	24,0	25,4	0,6%	0,5%
20	15,4	25,9	27,5	25,7	27,4	0,6%	0,5%
25	15,8	27,2	29,1	27,1	29,0	0,6%	0,5%
30	16,2	28,3	30,5	28,2	30,3	0,6%	0,5%
32	16,3	28,7	30,9	28,5	30,8	0,6%	0,6%
50	17,1	31,5	34,3	31,3	34,1	0,6%	0,6%
100	18,3	36,0	39,9	35,7	39,6	0,6%	0,8%
500	20,6	47,4	54,5	47,0	53,8	0,8%	1,2%
1000	21,5	52,8	61,6	52,3	60,7	0,9%	1,4%

Fuente: Autoría propia

Tabla 15: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P3)

REF	SSP2-4,5	SSP5-8,5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	20,9	27,0	26,2	26,4	2,3%	2,7%
2	25,5	33,0	32,6	32,4	1,9%	2,0%
3	29,4	38,9	38,9	38,3	1,6%	1,6%
4	31,7	42,8	43,2	42,1	1,5%	1,4%
5	33,3	45,7	46,5	45,1	1,4%	1,4%
7	35,5	50,2	51,5	49,5	1,4%	1,3%
10	37,7	54,9	56,8	54,1	1,4%	1,2%
12	38,7	57,3	59,5	56,5	1,4%	1,2%
15	40,0	60,3	62,9	59,4	1,4%	1,2%
20	41,5	64,2	67,4	63,3	1,4%	1,2%
25	42,6	67,2	71,0	66,3	1,4%	1,3%
30	43,5	69,8	73,9	68,7	1,5%	1,3%
32	43,8	70,7	75,0	69,6	1,5%	1,3%
50	45,8	77,0	82,4	75,9	1,5%	1,4%
100	48,7	87,4	94,7	85,9	1,7%	1,5%
500	54,6	114,0	127,0	111,6	2,1%	2,1%
1000	56,9	126,8	142,8	123,8	2,3%	2,4%

Fuente: Autoría propia

Tabla 16: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P4)

REF	SSP2-4,5	SSP5-8,5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5- 8,5
1	14,6	18,2	17,6	17,4	4,4%	4,7%
2	17,5	21,6	21,3	20,7	3,8%	3,8%
3	19,8	24,8	24,8	24,0	3,5%	3,4%
4	21,2	27,0	27,1	26,1	3,3%	3,2%
5	22,2	28,6	28,9	27,7	3,3%	3,1%
7	23,6	31,0	31,6	30,0	3,2%	3,0%
10	24,9	33,6	34,5	32,5	3,1%	2,9%
12	25,5	34,9	36,0	33,8	3,1%	2,9%
15	26,3	36,5	37,8	35,4	3,1%	2,9%
20	27,2	38,6	40,2	37,4	3,0%	2,9%
25	27,9	40,3	42,1	39,0	3,0%	3,0%
30	28,5	41,6	43,7	40,4	3,0%	3,0%
32	28,7	42,1	44,2	40,8	3,0%	3,0%
50	30,0	45,5	48,2	44,1	3,1%	3,1%
100	31,8	51,1	54,7	49,4	3,2%	3,4%
500	35,7	65,1	71,5	62,9	3,5%	4,1%
1000	37,3	71,8	79,6	69,2	3,6%	4,5%

Fuente: Autoría propia

Tabla 17: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P5)

REF	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	5,2	6,7	6,6	6,4	2,6%	3,0%
2	6,4	8,2	8,2	8,0	2,1%	2,3%
3	7,4	9,6	9,7	9,5	1,8%	1,9%
4	8,0	10,6	10,7	10,6	1,7%	1,7%
5	8,4	11,3	11,5	11,4	1,7%	1,6%
7	9,0	12,4	12,7	12,5	1,6%	1,4%
10	9,6	13,5	14,0	13,8	1,6%	1,4%
12	9,9	14,1	14,6	14,4	1,7%	1,4%
15	10,3	14,8	15,4	15,2	1,7%	1,3%
20	10,7	15,8	16,5	16,3	1,7%	1,3%
25	11,0	16,5	17,3	17,1	1,8%	1,4%
30	11,3	17,1	18,0	17,7	1,8%	1,4%
32	11,4	17,3	18,2	18,0	1,8%	1,4%
50	12,0	18,9	20,0	19,7	1,9%	1,4%
100	12,8	21,3	22,8	22,4	2,1%	1,6%
500	14,7	27,7	30,0	29,4	2,7%	2,0%
1000	15,4	30,8	33,5	32,8	2,9%	2,2%

Fuente: Autoría propia

Tabla 18: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P6)

REF	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	5,9	7,3	7,1	6,7	4,6%	5,3%
2	7,0	8,7	8,6	8,4	3,8%	4,0%
3	8,0	10,0	10,0	9,7	3,4%	3,3%
4	8,5	10,9	10,9	10,5	3,3%	3,0%
5	8,9	11,5	11,7	11,2	3,2%	2,8%
7	9,5	12,5	12,8	12,4	3,2%	2,6%
10	10,1	13,5	13,9	13,6	3,2%	2,5%
12	10,3	14,1	14,5	14,2	3,2%	2,5%
15	10,6	14,7	15,3	14,9	3,2%	2,4%
20	11,0	15,6	16,2	15,8	3,3%	2,4%
25	11,3	16,3	17,0	16,6	3,3%	2,5%
30	11,5	16,8	17,6	17,2	3,4%	2,5%
32	11,6	17,0	17,9	17,4	3,4%	2,5%
50	12,1	18,4	19,5	19,0	3,6%	2,6%
100	12,9	20,6	22,1	21,5	3,9%	2,8%
500	14,6	26,4	29,0	27,9	4,7%	3,6%
1000	15,2	29,1	32,3	31,0	5,1%	4,0%

Fuente: Autoría propia

Tabla 19: Comparación de los caudales máximos para SSP2-4,5 y SSP5-8,5 con y sin SbN por periodo de retorno (P7)

	REF	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4,5 + SBN	SSP5-8,5 + SBN	REDUCCIÓN SSP2-4,5	REDUCCIÓN SSP5-8,5
1	94,4	119,1	115,5	115,2	111,4	3,3%	3,6%
2	114,0	143,5	141,6	139,6	137,7	2,7%	2,7%
3	130,1	166,7	166,8	162,7	163,0	2,4%	2,3%
4	139,6	182,1	183,7	178,0	179,9	2,3%	2,1%
5	146,2	193,7	196,6	189,5	192,7	2,2%	2,0%
7	155,4	211,0	215,9	206,5	211,8	2,1%	1,9%
10	164,1	229,2	236,4	224,4	232,0	2,1%	1,9%
12	168,3	238,5	247,0	233,6	242,4	2,1%	1,8%
15	173,2	250,0	260,1	244,8	255,3	2,1%	1,8%
20	179,2	264,9	277,2	259,4	272,0	2,1%	1,9%
25	183,7	276,6	290,6	270,8	285,1	2,1%	1,9%
30	187,2	286,2	301,8	280,2	296,0	2,1%	1,9%
32	188,4	289,6	305,8	283,6	299,9	2,1%	1,9%
50	196,4	313,7	333,9	307,0	327,1	2,1%	2,0%
100	207,9	352,6	379,8	344,6	371,2	2,3%	2,2%
500	230,9	450,9	498,2	439,1	483,8	2,6%	2,9%
1000	239,6	497,4	555,3	483,4	537,4	2,8%	3,2%

Fuente: Autoría propia

6. Discusión de los resultados

Los modelos hidrológicos como TETIS sirven para comparar el comportamiento frente a diferentes escenarios en un mismo territorio, ayudando a los responsables de la toma de decisiones a planificar estrategias de resiliencia y adaptación al clima a partir de resultados robustos con base física a pesar de las diferentes fuentes de incertidumbre. Con los resultados mostrados en el tópico anterior, es posible ver cómo los valores estimados de precipitación futura se traducen en caudales para diferentes periodos de retorno y, con ello, se hace más tangible la potencial necesidad de intervenir en el territorio de la cuenca del Ribeirão Arrudas para reducir los riesgos asociados.

Los datos de las tablas anteriores para cada uno de los puntos considerados - P1 a P7 muestran el % de variación de los caudales máximos para escenarios de cambio climático considerando la implantación de SbN para caudales con diferentes periodos de retorno. Los gráficos muestran los mismos datos correlacionándolos gráficamente.

Para los siete puntos, se observó que las medidas son más eficaces para los extremos inferior y superior del periodo de retorno, es decir, para valores intermedios

de PR, las SbN tienen menos efecto sobre el territorio. Considerando que las crecidas con PRs de 1 y 2 años son las más frecuentes, se puede ver que las medidas tienen el potencial de reducir la probabilidad de los daños al reducir los caudales máximos diarios anuales en un 3,3%, 1,2%, 2,3%, 4,4%, 2,6%, 4,6% y 3,3% para P1 a P7, respectivamente, al considerar los escenarios SSP2-4,5. Para los escenarios SSP5-8,5, estos valores serían: 3,6%, 1,4%, 2,7%, 4,7%, 3,0%, 5,3% y 3,6%. Para SSP2-4,5 las reducciones para PR de 2 años son: 2,7%, 0,9%, 1,9%, 3,8%, 2,1%, 3,8% y 2,7%. Para SSP5-8,5 estos valores son: 2,7%, 1,0%, 2,0%, 3,8%, 2,3%, 4,0% y 2,7%.

Considerando las crecidas con un PR de 500 o 1.000, que a pesar de su baja probabilidad tienen una mayor magnitud e impacto destructivo, las SbN también tienen efectos que deben tenerse en cuenta. Para PR iguales a 1.000 años y el escenario SSP2-4,5, se produce una reducción del 2,8%, 0,9%, 2,3%, 3,6%, 2,9%, 5,1% y 2,8%. Para el escenario SSP5-8,5, los valores son: 3,2%, 1,4%, 2,4%, 4,5%, 2,2%, 4,0% y 3,2%. Para un PR igual a 500 años, hay una reducción del 2,6%, 0,8%, 2,1%, 3,5%, 2,7%, 4,7% y 2,6% para el escenario SSP2-4,5 y del 2,9%, 1,2%, 2,1%, 4,1%, 2,0%, 3,6% y 2,9% para el escenario SSP5-8,5.

Se pudo observar que, para todos los puntos, la efectividad de las SbN eran más significativas para el escenario SSP2-4,5 si se consideran los caudales con PR intermedio y más significativos para SSP5-8,5 si se consideran los caudales con PR igual a 1 o 1.000 años, con la excepción de los puntos P5 y P6, en los que tanto para los PR intermedios como para los de 1.000 años las SbN son más eficaces en el escenario SSP2-4,5. El contexto donde las medidas tuvieron mayor influencia positiva de todos los analizados fue en el punto 6 (Córrego do Leitão) para un periodo de retorno de 1 año en el escenario SSP5-8,5 - reducción de 5,3%. En general, este punto registró las mayores reducciones porcentuales, seguido de P4 (Ribeirão Arrudas). Estos dos puntos están cerca de las dos mayores concentraciones de cubiertas verdes propuestas, lo que puede contribuir a estos resultados al tener una mayor relación de incremento de retención de agua en la cuenca vía SbN, con respecto a su área de drenaje. Lo anterior ya ha sido demostrado también en otros estudios en diferentes cuencas europeas con diferentes tipos de medidas, como se muestra en Salazar *et al.* (2012). En lógica inversa, el punto que mostró menos reducciones de caudal con la aplicación de SbN fue P2 (Córrego do

Barreiro), seguido de P3 (Córrego Água Branca). Ambos están situados en cabecera de cuenca y, por lo tanto, tienen una menor influencia de las medidas propuestas al existir menos área urbana. Lo anterior apunta que las SbN necesariamente tienen que ir acompañadas con otras medidas para lograr sinergias y reducir el riesgo (e.g. otras SbN como pavimentos permeables, humedales. Además de evitar el crecimiento en las pocas áreas donde no se ha expandido la ciudad y mejorar la capacidad de tránsito de las crecidas a lo largo de la red de drenaje, vía renaturalización de canales con algunas medidas que ayuden a reducir la velocidad de flujo y contribuyan a la desincronización de los caudales máximos a lo largo de la red).

Una de las razones para elegir puntos en Córrego Jatobá y Córrego do Leitão fue también comparar los resultados con investigaciones similares ya realizadas para estas áreas de contribución. Como se mencionó en el tópico 1.2, Oliveira (2022) realizó simulaciones para la implementación de pavimentos permeables y cubiertas verdes para el Córrego Jatobá, mientras que Rosa (2017) simuló la implementación de pavimentos permeables, cubiertas verdes, reservorios individuales, desconexión de techos y trincheras de infiltración para la cuenca del Córrego do Leitão. Ambos estudios encontraron valores de reducción de caudal significativamente superiores a los constatados en este estudio. Oliveira (2022), por ejemplo, encontró reducciones de alrededor del 20% para PRs de 5, 10 y 50 años. Rosa (2017), por su parte, con la implementación de 5 técnicas diferentes, consiguió alcanzar una reducción de caudales de hasta el 60% con el tratamiento del 100% del área impermeable disponible.

Se estima que las reducciones fueron mayores en esos estudios, porque consideraron escenarios más optimistas de implantación de SbN que abarcaban porcentajes muy elevados del área urbana de los territorios en cuestión. En ambos, por ejemplo, se han incluido cubiertas verdes en superficies a partir de 100 m². La diferencia en el porcentaje de intervención para los resultados observados también es visible en Rosa (2017), cuando muestra que cuando la intervención es solo del 10% de la superficie impermeable, la reducción del caudal desciende a alrededor del 5%, un escenario que el propio autor considera más realista. En el caso de este estudio, la superficie total de las intervenciones realizadas equivale aproximadamente al 7% de la superficie total de la cuenca Arrudas. Así, se entiende que los resultados aquí presentados siguen el mismo

orden de magnitud que los presentados por Rosa (2017), comparando % de superficie intervenida y % de reducción de caudales máximos, en escenarios más realistas.

Se puede concluir, por tanto, que la eficacia de las medidas varía en función de la región en la que se plantee la simulación y % de intervención planteado. A medida que las SbN se conviertan en protagonistas de la planificación urbana local, es interesante realizar análisis específicos para las distintas regiones considerando diferentes tipos de infraestructuras verdes y si es el caso algunas grises. Como se ha visto en otros estudios, las infraestructuras verdes pueden potenciar la efectividad de las grises (UNEP, 2021). Otro factor importante a considerar es que, aunque los porcentajes de reducción de caudales máximos diarios anuales (caudales instantáneos medios en un día) encontrados no son tan elevados, sí son importantes si tenemos en cuenta que estas reducciones pueden marcar la diferencia a la hora de evitar que los caudales máximos instantáneos se desborden y produzcan inundaciones. Cuando se evitan las inundaciones, también se evitan todos los daños y costes que suponen las pérdidas materiales y humanas que se producen con frecuencia en la cuenca del Arrudas. Por último, cabe señalar que, una vez que es posible identificar ordenamientos territoriales eficaces para la implantación de las SbN en relación con la prevención de inundaciones, también es necesario analizar la relación coste-beneficio de los diversos escenarios posibles, comparando la inversión con los gastos potenciales que tales episodios suelen exigir, tanto para el sector público como para el privado.

7. Conclusiones

El cambio climático y sus impactos sobre la naturaleza y la sociedad son ya una realidad. Los estudios de proyecciones futuras a escala global o regional, entre algunas incertidumbres, muestran que es probable que estos retos aumenten y, ante este escenario, la adaptación climática, junto con la mitigación, son medios esenciales para que el territorio gane la resiliencia que estos retos exigen. Los retos son aún mayores si tenemos en cuenta los desequilibrios metabólicos a nivel territorial derivados de los intensos procesos de urbanización. Estos procesos han prescindido por completo de la naturaleza, o casi por completo, en sus procesos de expansión, anulando su prestación de servicios ecosistémicos. Tal es el caso de la cuenca del Ribeirão Arrudas, donde esta disociación ha tenido diversos impactos materiales e inmateriales sobre su territorio a lo largo de la historia de su ocupación. El sellamiento de las coberturas naturales a favor de la urbanización, la ocupación de las zonas naturales de inundación, así como la canalización de la red de drenaje ha traído como consecuencia la generación y materialización del riesgo. La nueva configuración que ha tomado el territorio de la cuenca, con de las formas artificiales de drenaje urbano diseñadas para evacuar eventos hidrometeorológicos extremos, ha mostrado sus consecuencias a la población que vive en Belo Horizonte al producirse frecuentemente inundaciones.

En casos como estos, la adaptación territorial es esencial. Sin embargo, como señalan el IPCC (2015) y Mertz *et al.* (2009), es importante considerar que su eficacia para reducir los riesgos tiene límites. Por lo tanto, es importante adoptar una perspectiva a largo plazo, en el contexto del desarrollo sostenible y la resiliencia, de modo que las acciones de adaptación más inmediatas también mejoren la preparación para el futuro, más aún, teniendo en cuenta las incertidumbres sobre la permanencia de los efectos climáticos observados a corto plazo y las proyecciones futuras. Además del horizonte temporal, es fundamental tener en cuenta las diferencias regionales a la hora de planificar y aplicar medidas de adaptación como las SbN, considerando que vivimos en una realidad compleja de desigualdades socioeconómicas entre regiones y países, en la que las sociedades pobres se vuelven aún más vulnerables si consideramos los fenómenos climáticos extremos. Por este motivo, las políticas de adaptación deben tener en cuenta, además de los criterios medioambientales, los elementos

socioeconómicos propios de cada lugar para que la vulnerabilidad climática se reduzca realmente sin causar efectos contraproducentes para partes de la sociedad.

Como herramientas de adaptación al clima, las SbN han ido ganando terreno entre los responsables de la toma de decisiones, pero aún necesitan romper varias barreras antes de poder ser ampliamente difundidas en el tejido urbano, más allá de los países desarrollados donde ya son una realidad más frecuente. En este sentido, cabe destacar la importancia de producir conocimiento sobre la eficacia de estas herramientas como forma de difundir sus beneficios y acercarlas a la planificación urbana. De esta forma, corresponde a los planificadores urbanos del presente y del futuro alejarse de la planificación "*business-as-usual*" hacia formas innovadoras de utilizar la biodiversidad para adaptar el territorio, en las que, en lugar de ser vistas como costes, sean vistas como activos sociales, ambientales y económicos, tal y como señala el PNUMA (2021).

Las ciudades albergan ya a más de la mitad de la población mundial y la tendencia es que esta cifra aumente en las próximas décadas. Representan, por tanto, una gran parte del problema que estamos viviendo, pero también son fuentes potenciales de soluciones ante los cambios globales. Además de su alta densidad de población, su elevada complejidad las hace aún más vulnerables a las catástrofes climáticas y medioambientales globales, lo que repercute directamente en sus habitantes. La creación de ciudades más resilientes y adaptables a los cambios globales actuales y futuros es, por tanto, fundamental, siendo las SbN una excelente herramienta para el control de inundaciones y la reducción de los riesgos asociados. Además de los potenciales beneficios climáticos y para la biodiversidad resultantes de la introducción de más vegetación en el tejido urbano. Por fin, considerando la realidad del contexto ambiental local, cabe mencionar la importancia de la concienciación ambiental sobre lo que representan las SbN dentro del tejido urbano, ya que su reconocimiento y correcto mantenimiento es fundamental para que sus funcionalidades y beneficios perduren.

Este estudio pretende aportar información práctica y contrastada, a través de la modelación hidrológica y ambiental distribuida, sobre cómo los municipios que componen la cuenca del Ribeirão Arrudas, pueden convertirse en zonas más resilientes. A pesar de los bajos resultados obtenidos en efectividad (como máximo 5% de reducción

del caudal máximo diario anual – expresión del promedio de los diarios instantáneos), para los siete puntos geográficos analizados, la aplicación de las SbN ha mostrado servir de potencial de medida de adaptación. Esto ocurre si consideramos que tales reducciones pueden convertirse en la diferencia en que los caudales máximos instantáneos no lleguen a desbordarse y producir inundaciones con las ya conocidas grandes pérdidas materiales y afectaciones humanas que dichos episodios acarrearán para el territorio.

Tal conclusión es de especial relevancia a nivel de planificación urbana y de gestión de los riesgos presentes y futuros frente al cambio climático, en la medida que un análisis como el aplicado en el presente trabajo puede contribuir a probar muchas configuraciones de escenarios en el territorio dando resultados robustos para la priorización y estudios de mayor detalle. Es importante destacar que en este estudio se ha intentado adoptar los supuestos de intervención más realistas posibles, lo que muestra las ganancias potenciales si los municipios deciden intervenir, o estimular las intervenciones del sector privado, para escenarios optimistas más allá del aquí propuesto. Además del realismo propuesto en las SbN, los resultados de la modelación hidrológica para las condiciones presente (con coeficientes N&S de 0,85 para la calibración y de 0,57 para la validación) están mostrando que los resultados son representativos del funcionamiento hidrológico real de la cuenca estudiada. Finalmente, en este estudio no se midieron los efectos de las SbN en el clima, la biodiversidad, la calidad del agua, el paisajismo y el bienestar de la población, lo que significa que los beneficios generados van más allá de los estimados en términos de reducción de caudales máximos.

Es importante considerar todos los beneficios que aporta la implantación de SbN para la mejora de la calidad de vida en las metrópolis y la recuperación de la noción de territorio, reconectando la actividad antrópica con el de medio natural a través de infraestructura verde, a la vez que éstas aportan más resiliencia a la cuenca del Ribeirão Arrudas frente a los retos actuales y futuros derivados del cambio climático.

A partir de las conclusiones derivadas del presente trabajo, se presentan las siguientes recomendaciones de líneas de trabajo futuras:

Se recomienda utilizar más de una estación fluviométrica con datos de caudal de períodos históricos más allá del utilizado para validar el modelo espacial y temporalmente (aquí solo fue posible temporalmente porque se disponían de datos de una sola estación).

Se recomienda considerar otros tipos de SbN además de los aquí propuestos, como pavimentos permeables y trincheras de infiltración, además de probar la introducción de medidas grises, para buscar maximizar los beneficios.

Se recomienda que los ayuntamientos integren cada vez más directrices para apoyar la implantación de SbN en el tejido urbano, incluso mediante incentivos económicos en la construcción y/o renovación de edificios. Asimismo, deberían adoptar prácticas similares para el resto de zonas públicas, como las mapeadas en este estudio, para la inclusión de jardines de lluvia o medidas similares.

Se recomienda establecer zonas prioritarias en función de la incidencia de las inundaciones y del potencial de reducción del crecimiento excesivo con diferentes técnicas de SbN, para que los ya escasos recursos no pierdan su eficacia. Además, teniendo en cuenta la realidad política local, el establecimiento de asociaciones público-privadas se considera una buena forma de catalizar esta agenda.

REFERENCIAS

ADB. **NATURE-BASED SOLUTIONS FOR BUILDING RESILIENCE IN TOWNS AND CITIES:** case studies from de greater mekong subregion. Mandaluyong: Asian Development Bank, 2016.

AGÊNCIA IBGE. **Censo 2022:** de 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 18 ago. 2023.

AGUIAR, Tito Flávio Rodrigues de. **Vastos Subúrbios da Nova Capital:** formação do espaço urbano na primeira periferia de belo horizonte. 2006. 443 f. Tese (Doutorado) - Curso de História, Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ALMAGRO, Andre *et al.* **CABra: a novel large-sample dataset for Brazilian catchments.** 2023. Versão 5. Disponível em: <https://zenodo.org/records/7612350>. Acesso em: 14 set. 2023.

ARGÜESO, Daniel; LUCA, Alejandro di; EVANS, Jason P. Precipitation over urban areas in the western Maritime Continent using a convection-permitting model. **Climate Dynamics**, [S.L.], v. 47, n. 3-4, p. 1143-1159, 2 nov. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2893-6>.

ARRHENIUS, Svante. **Worlds in the Making:** the evolution of the universe. New York And London Harper & Brothers Publishers, 1908. 230 p.

ASSIS, Wellington Lopes. **Dados Históricos INMET - Solicitação Dissertação Mestrado.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <amandagranha@gmail.com>. em: 10 out. 2023.

ASSIS, Wellington Lopes. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial.** 2010. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

A ZUNIGA-TERAN, Adriana *et al.* Urban resilience and green infrastructure systems: towards a multidimensional evaluation. **Current Opinion In Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 44, p. 42-47, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2020.05.001>.

BALL, James E. Modelling accuracy for urban design flood estimation. **Urban Water Journal**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 87-96, 28 jul. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2021.1955283>.

BALLARIN, André Simões *et al.* CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1-16, 20 jan. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>.

BARRERA, Francisco Borja; OLMO, Carlos Montes del. LA GESTIÓN ECOSISTÉMICA COMO HERRAMIENTA TERRITORIAL PARA LA TOMA DE DECISIONES. ECORREGIONES E INTEGRACIÓN FUNCIONAL DE CARRETERAS Y ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS EN

ANDALUCÍA. In: II CONGRESO NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE EN CARRETERAS, 2., 2008, Santander. **Conference Paper**. 2008. p. 1-30.

BORSAGLI, Alessandro. **Rios Invisíveis da Metrópole Mineira**. Belo Horizonte: Clube de Autores, 2016. 430 p.

BORSAGLI, Alessandro; BERNARDES, Brenda. O Ribeirão Arrudas em Belo Horizonte: de elemento integrador e indutor da ocupação urbana para obstáculo no desenvolvimento da urbe mineira. **Cadernos ProARQ**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 86-102, dez. 2015. Semestral.

BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H. F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 59, n. 5, p. 847-855, 1 mar. 2009. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.029>.

CAJAZEIRO, Joana Maria Drumond. **Análise da susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de contribuição do ribeirão Arrudas e córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CAVALCANTE, Lucas Vinicius Bezerra. **A bacia do rio Arrudas: análise das inundações entre 1930 a 2005 no município de Belo Horizonte/MG**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CBH VELHAS. Plano Diretor de Recursos Hídricos: Unidade Territorial Estratégica Ribeirão Arrudas. Belo Horizonte, 2016. 12 p.

CHEN, Yan; CHEN, Hongmei. The Collective Strategies of Key Stakeholders in Sponge City Construction: a tripartite game analysis of governments, developers, and consumers. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 1087, 11 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12041087>.

CHRISTOFIDIS, Demetrios; ASSUMPÇÃO, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes; KLIGERMAN, Débora Cynamon. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 94-108, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-11042019s307>.

CITY OF PORTLAND. **About Combined Sewer Overflows or CSOs**. Disponível em: <https://www.portland.gov/bes/about-csos>. Acesso em: 31 out. 2023a.

CITY OF PORTLAND. **Green Streets**: portland green street program. Portland Green Street Program. Disponível em: <https://www.portlandoregon.gov/bes/45386>. Acesso em: 31 out. 2023b.

CITY PARKS ALLIANCE. **PORTLAND'S GREEN STREET PROGRAM**. Disponível em: <https://cityparksalliance.org/resource/portland-green-street-program/>. Acesso em: 31 out. 2023

CLIMATE CHANGE KNOWLEDGE PORTAL. **Brazil**: Mean rojections. Disponível em: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/brazil/climate-data-projections>. Acesso em: 17 maio 2023.

CRED; UNDRR. **Human cost of disasters**: an overview of the last 20 years 2000-2019. 2020. 30 p.

COSTA, Walter Duarte. **Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte - MG**. 2002. 435 f. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CUNNANE, C. Unbiased plotting positions — A review. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 37, n. 3-4, p. 205-222, maio 1978. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90017-3](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3).

CURRAL DEL REY BLOGSPOT. **"Boulevard" Arrudas: um exemplo das mazelas legadas por um poder público incompetente**. Disponível em: <http://curraldelrei.blogspot.com/2015/05/boulevard-arrudas-um-exemplo-das.html>. Acesso em: 03 abr. 2023b.

CURRAL DEL REY BLOGSPOT. **Qualquer semelhança não é mera coincidência**: o destino dos rios urbanos que atravessam a capital. o destino dos rios urbanos que atravessam a capital. [S.I.]. Disponível em: <http://curraldelrei.blogspot.com/2010/11/qualquer-semelhanca-nao-e-mera.html>. Acesso em: 03 abr. 2023a.

DERKZEN, Marthe. **What Do Rotterdammers Want in Green Infrastructure? We Asked Them**. 2016. Disponível em: <https://www.thenatureofcities.com/2016/07/24/what-do-rotterdammers-want-in-green-infrastructure-we-asked-them/>. Acesso em: 17 out. 2023.

DRUMOND, Rafael Augusto Santos; ALMEIDA, Renan Pereira; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte. **Cadernos MetrÓpole**, [S.L.], v. 25, n. 58, p. 899-922, dez. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5806>.

EARTHWATCH. **Earthwatch Institute**: how to build a rain garden. How to Build a Rain Garden. Disponível em: <https://earthwatch.org/stories/how-build-rain-garden>. Acesso em: 20 set. 2023.

EGGERMONT, Hilde *et al.* Nature-based Solutions: new influence for environmental management and research in europe. **Gaia - Ecological Perspectives For Science And Society**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 243-248, 1 jan. 2015. Oekom Publishers GmbH. <http://dx.doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>.

EPA. **Green Infrastructure Case Studies**: municipal policies for managing stormwater with green infrastructure. Washington: Office Of Wetlands, Oceans And Watersheds, 2010. 76 p.

ESTADO DE MINAS. **Em apenas um mês, BH recebeu a chuva de um ano inteiro**. 2020b. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/01/30/interna_gerais,1118075/em-apenas-um-mes-bh-recebeu-a-chuva-de-um-ano-inteiro.shtml. Acesso em: 20 out. 2023.

ESTADO DE MINAS. **Vídeo mostra impressionantes ondas no Arrudas, com temporal em BH**. 2020a. Disponível em:

https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/01/19/interna_gerais,1115371/vidео-mostra-impressionantes-ondas-no-arrudas-com-temporal-em-bh.shtml. Acesso em: 20 out. 2023.

FLEMING, James Rodger. **Historical Perspectives on Climate Change**. Oxford University Press, Incorporated, 1998. 209 p.

FRIZON, Ana Julia *et al.* Telhados verdes como alternativa para construções sustentáveis. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 13, n. 5, p. 620-629, 1 dez. 2018. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i5.6197>.

GANESHAN, Manisha; MURTUGUDDE, Raghu. Nocturnal propagating thunderstorms may favor urban “hot-spots”: a model-based study over minneapolis. **Urban Climate**, [S.L.], v. 14, p. 606-621, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.005>.

GILL, Daisy. **Sponge City Concepts Could Be The Answer to China’s Impending Water Crisis**. 2021. Disponível em: <https://earth.org/sponge-cities-could-be-the-answer-to-impending-water-crisis-in-china/>. Acesso em: 31 out. 2023.

GFDRR; World Bank Group. **URBAN WETLANDS MANAGEMENT IN COLOMBO: a new model for urban resilience**. Washington: World Bank Group, 2018. 2 p.

GIMHA. **DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9**. Valencia: Universitat Politècnica De Valencia, 2021. 97 p. Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente.

G1 MINAS. **Chuva destrói parte de BH; MG tem 55 mortos em 6 dias**. 2020b. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/29/apos-mais-um-temporal-com-enchentes-bh-e-regiao-metropolitana-contabilizam-mais-estragos.ghtml>. Acesso em: 20 out. 2023.

G1 MINAS. **Regiões do Barreiro e Oeste de BH registram um terço das chuvas esperadas para o mês**. 2020a. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/19/regioes-barreiro-e-oeste-em-bh-registram-um-terco-das-chuvas-esperadas-para-o-mes.ghtml>. Acesso em: 20 out. 2023.

HAN, Ji-Young; BAIK, Jong-Jin; KHAIN, Alexander P. A Numerical Study of Urban Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation. **Journal Of The Atmospheric Sciences**, [S.L.], v. 69, n. 2, p. 504-520, 2 fev. 2012. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jas-d-11-071.1>.

HAASE, Annegret. The Contribution of Nature-Based Solutions to Socially Inclusive Urban Development– Some Reflections from a Social-environmental Perspective. In: KABISCH, Nadja *et al.* **Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: linkages between science, policy and practice**. Springer Cham, 2017. p. 1-342. (Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions).

HENGL, Tomislav *et al.* SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. **Plos One**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1-40, 16 fev. 2017. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>.

HOLLIS, G. E. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 431-435, jun. 1975. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr011i003p00431>.

IBGE. **Panorama Censo 2022**: crescimento populacional. 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

IBGE. **Sabará**: história. História. 2015. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sabara/historico>. Acesso em: 01 out. 2023.

IBGE. **Séries Históricas e Estatísticas**: Taxa de Urbanização. 2010. Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ICLEI. **INTERACT-Bio: Belo Horizonte inaugura jardim de chuva com o ICLEI**. 2022. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/interact-bio-belo-horizonte-ganha-seu-primeiro-jardim-de-chuva/>. Acesso em: 18 ago. 2023.

IGAM. **Igam disponibiliza mapas sobre estados de vazão em porções hidrográficas de Minas**. 2015. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/1563-igam-disponibiliza-mapas-sobre-estados-de-vazao-em-porcoes-hidrograficas-de-minas>. Acesso em: 18 jun. 2023.

INMET. **BDMEP**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 29 set. 2023.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**: 1991 - 2020. Brasília: INMET, 2022. 27 p.

IPCC. **Climate Change 2001**: synthesis report. Cambridge University Press, 2001. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Climate Change 2007**: the physical science basis. Cambridge University Press, 2007. 1007 p. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC.

IPCC. **Climate Change 2014**: impacts, adaptation, and vulnerability. part a: global and sectoral aspects. Cambridge University Press, 2014. 1132 p. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Climate Change 2014**: synthesis report. 2015. 151 p. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Climate Change 2021**: the physical science basis. Cambridge University Press, 2021. 2391 p. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. **Emissions Scenarios**. Cambridge University Press, 2000. 608 p. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

JÚNIOR, Valdevino José dos Santos; SANTOS, Carolina Oliveira. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. **Estação Científica (Unifap)**, Macapá, v. 3, n. 1, p. 19-30, jan. 2013. Semestral.

KATES, Robert W. Cautionary Tales: adaptation and the global poor. **Climatic Change**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 5-17, abr. 2000. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1005672413880>.

KFW. **A rehabilitated river with a new park**. 2022. Disponível em: <https://www.kfw-entwicklungsbank.de/Global-commitment/Subsahara-Africa/Mozambique/Project-information-Urban-development/>. Acesso em: 31 out. 2023.

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 13-24, mar. 1986. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626668609491024>.

LI, Hui *et al.* Sponge City Construction in China: a survey of the challenges and opportunities. **Water**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 1-17, 28 ago. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9090594>.

MACEDO, Diego Rodrigues; UMBELINO, Glauco. Correlação espacial entre a evolução da mancha urbana e indicadores sócio-demográficos em Belo Horizonte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. INPE, 2009. p. 739-746.

MARSHALL, N. A. *et al.* **A Framework for Social Adaptation to Climate Change: sustaining tropical coastal communities and industries**. Gland: Iucn, 2010. 36 p.

MCUDP. **Executive Directors Special Visit to Beddagana Wetland Park**. 2017. Disponível em: <https://mcupd.lk/photos/view/executive-director-field-visit>. Acesso em: 31 out. 2023.

MELO, Tássia dos Anjos Tenório de. **Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MERTZ, Ole *et al.* Adaptation to Climate Change in Developing Countries. **Environmental Management**, [S.L.], v. 43, n. 5, p. 743-752, 31 jan. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-008-9259-3>.

MORIASI, Daniel *et al.* Hydrologic and Water Quality Models: performance measures and evaluation criteria. **Transactions Of The Asabe**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 30 dez. 2015. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10715>.

MUKHERJEE, Mahua; TAKARA, Kaoru. Urban green space as a countermeasure to increasing urban risk and the UGS-3CC resilience framework. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 28, p. 854-861, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.01.027>.

MUSSETTA, Paula. La adaptación como respuesta al cambio climático: Notas acerca de las contrararas de un paradigma dominante. **Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**, Barcelona, v. 24, n. 634, p. 1-22, 15 mar. 2020. Edicions de la Universitat de Barcelona. <http://dx.doi.org/10.1344/sn2020.24.27841>.

NASA (Estados Unidos). **EARTHDATA**: earthdata search. EARTHDATA SEARCH. ASTER Global Digital Elevation Model V003. Disponível em:

[https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1711961296-LPCLOUD&pg\[0\]\[v\]=f&pg\[0\]\[gsk\]=-start_date&fi=ASTER&tl=1668704558!3!!](https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1711961296-LPCLOUD&pg[0][v]=f&pg[0][gsk]=-start_date&fi=ASTER&tl=1668704558!3!!). Acesso em: 20 nov. 2022.

NASCIMENTO, Nilo *et al.* Using Green and Blue Infrastructure for Urban Flood Mitigation: simulating scenarios for climate change, GBI technologies, and land policy. **Lincoln Institute Of Land Policy**, p. 1-84, ago. 2022.

NATIVIDADE, Ulisses Antônio; GARCIA, Sâmia Regina; TORRES, Roger Rodrigues. Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 600-614, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786324008>.

NUNES, Aline de Araújo *et al.* Intensity-duration-frequency curves in the municipality of Belo Horizonte from the perspective of non-stationarity. **RBRH**, [S.L.], v. 26, p. 1-14, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.262120210017>.

OLIVEIRA, Gabriela Rosa. **Modelagem hidrológica com o uso de infraestruturas verdes: Estudo de caso do Córrego Jatobá, em Belo Horizonte**. 2022. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

OLIVEIRA, Marcelo Tuler de. **Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG**. 2009. 279 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

O'NEILL, Brian C. *et al.* The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 42, n. 1, p. 169-180, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.

OPPLA. **Rotterdam - NBS for building a waterproof city**. Disponível em: <https://oppla.eu/casestudy/19457>. Acesso em: 26 out. 2023.

OPPERMAN, Jeffrey J. *et al.* Sustainable Floodplains Through Large-Scale Reconnection to Rivers. **Science**, [S.L.], v. 326, n. 5959, p. 1487-1488, 11 dez. 2009. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1178256>.

OZMENT, Suzanne; DIFRANCESCO, Kara; GARTNER, Todd. **Natural Infrastructure in the Nexus**. Gland: IUCN, 2015. 36 p. (Nexus Dialogue Synthesis Papers.).

PAUL, Supantha *et al.* Increased Spatial Variability and Intensification of Extreme Monsoon Rainfall due to Urbanization. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-10, 2 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-22322-9>.

PBH. **BH Map**: Download. IDE BHGEO. Disponível em: <https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=4&lat=7796893.0925&lon=609250.9075&baselayer=base>. Acesso em: 03 abr. 2023.

PBH. **CONTROLE NA FONTE E LANÇAMENTO NO SISTEMA PÚBLICO DE DRENAGEM**. In: PBH. **INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS DE DRENAGEM**. Belo Horizonte, 2022a. Cap. 3. p. 1-104.

PBH. **DRENAGEM URBANA EM BELO HORIZONTE**. In: PBH. **INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS DE DRENAGEM**. Belo Horizonte, 2022b. Cap. 1. p. 1-34.

PBH. **INTERACT-BIO**: ação integrada pela biodiversidade. Ação Integrada pela Biodiversidade. 2018. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/meio-ambiente/intercat-bio>. Acesso em: 17 jun. 2023.

PBH. **Operação Urbana Consorciada Antônio Carlos-Pedro I – Leste-Oeste**: posicionamento sobre as propostas apresentadas nos relatórios sobre o EIV. Belo Horizonte: Secretaria Municipal de Desenvolvimento e Secretaria Municipal Adjunta de Planejamento Urbano, s.f. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politica-urbana/2018/planejamento-urbano/oucaclo_posicionamento_smapu.pdf

PBH. **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE BELO HORIZONTE 2020/2023**: VOLUME I/II - TEXTO. Belo Horizonte: PBH, 2020. 321 p.

PBH (DGAU). **Solicitação de Base Cartográfica - UFMG**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <amandagranha@gmail.com>. em: 15 out. 2019.

PBH (DGAU). **Solicitação Dados Bacia Hidrográfica Ribeirão Arrudas**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <amandagranha@gmail.com>. em: 02 fev. 2023a.

PBH (DGAU). **Solicitação Dados Bacia Hidrográfica Ribeirão Arrudas**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <amandagranha@gmail.com>. em: 26 maio 2023b.

PBH (DGAU). **Solicitação Dados Bacia Hidrográfica Ribeirão Arrudas**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <amandagranha@gmail.com>. em: 27 out. 2023c.

PBMC. **Base Científica das Mudanças Climáticas**: Volume I - Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ, 2014. 464 p. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.

PELLING, Mark. **Adaptation to Climate Change**: from resilience to transformation. London And New York: Routledge, 2011. 274 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CONTAGEM. **Estruturação Urbana de Contagem**: evolução e quadro atual. Contagem: SMDU, 1993. 59 p.

Prefeitura de Contagem. **GeoContagem**: Sistema de Informações Geográficas Municipais. Disponível em: <https://geoprocessamento.contagem.mg.gov.br/sigm/>. Acesso em: 18 out. 2023.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. **Águas Doces no Brasil**. São Paulo: Escrituras, 2006. 748 p.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.L.], v. 1, p. 110-128, 8 nov. 2018. [Http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524](http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524).

REIS, André Luiz dos *et al.* Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais (Climatology and extreme rainfall events in the state of Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 652-660, 25 jun. 2018. *Revista Brasileira de Geografia Física*. <http://dx.doi.org/10.26848/rbfg.v11.2.p652-660>.

ROMÁN, Francisco Javier Sánchez San. **Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves**. Dpto. Geología Univ. Salamanca. Disponível em: https://hidrologia.usal.es/practicas/ET/ET_Hargreaves.pdf. Acesso em: 15 out. 2023.

RIAH, Keywan *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 42, p. 153-168, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

ROSA, Deyvid Wavel Barreto. **RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA URBANA À IMPLANTAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM URBANA - BACIA DO CÓRREGO DO LEITÃO, BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS**. 2017. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SALAZAR, S. *et al.* A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of "retaining water in the landscape" in different European hydro-climatic regions. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 3287-3306, 12 nov. 2012. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-3287-2012>.

SALAZAR-GALÁN, Sergio *et al.* A process-based flood frequency analysis within a trivariate statistical framework. Application to a semi-arid Mediterranean case study. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 603, p. 1-15, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127081>.

SALAZAR-GALÁN, Sergio; MASCORT-ALBEA, Emilio; SÁNCHEZ-FUENTES, Domingo. Redefinición territorial pos COVID-19: resiliencia frente a riesgos y desequilibrios en los modelos urbano-rurales. **Eure**, v. 48, p. 1-9, jan. 2022. Pontificia Universidad Católica de Chile. <http://dx.doi.org/10.7764/eure.48.143.16>.

SÁNCHEZ-FUENTES, Domingo; MASCORT-ALBEA, Emilio J.; SALAZAR-GALÁN, Sergio. TRANSICIONES NECESARIAS HACIA ENTORNOS METROPOLITANOS RESILIENTES A TRAVÉS DE LA BIORREGIÓN. **Estudios Geográficos**, Madrid, v. 84, n. 294, p. 1-9, jan./jun. 2023.

SARANGI, Chandan *et al.* Investigation of the aerosol–cloud–rainfall association over the Indian summer monsoon region. **Atmospheric Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 17, n. 8, p. 5185-5204, 21 abr. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-17-5185-2017>.

SAVI, Adriane Cordoni. **TELHADOS VERDES: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura**. 2012. 128 f. Monografia (Especialização) - Curso de Construções Sustentáveis, Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SCHUELER, Thomas R. **Controlling Urban Runoff**: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987. 227 p.

SCHMID, Paul E.; NIYOGI, Dev. Modeling Urban Precipitation Modification by Spatially Heterogeneous Aerosols. **Journal Of Applied Meteorology And Climatology**, [S.L.], v. 56, n. 8, p. 2141-2153, ago. 2017. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jamc-d-16-0320.1>.

SGB. **Elementos Que Caracterizam o Clima**. 2014. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publicue/SGB-Divulga/Canal-Escola/Elementos-Que-Caracterizam-o-Clima-1267.html#:~:text=Assim%2C%20a%20temperatura%20m%C3%A9dia%20que,chamad a%20de%20temperatura%20m%C3%A9dia%20compensada>. Acesso em: 11 out. 2023.

SHAFIQUE, Muhammad; KIM, Reeho. Recent Progress in Low-Impact Development in South Korea: water-management policies, challenges and opportunities. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 1-18, 6 abr. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10040435>.

SHASTRI, Hiteshri *et al.* Impacts of urbanization on Indian summer monsoon rainfall extremes. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, [S.L.], v. 120, n. 2, p. 496-516, 23 jan. 2015. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2014jd022061>.

SHAW, Keith; THEOBALD, Kate. Resilient local government and climate change interventions in the UK. **Local Environment**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 1-15, jan. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13549839.2010.544296>.

SHEPHERD, James Marshall. Impacts of Urbanization on Precipitation and Storms: physical insights and vulnerabilities. **Climate Vulnerability**, [S.L.], p. 109-125, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-384703-4.00503-7>.

SIGA RIO DAS VELHAS (Minas Gerais). CBH Velhas. **VELHASMap**. Disponível em: <https://www.siga.cbhvelhas.org.br/portal/index.zul>. Acesso em: 13 maio 2023.

SILVA, Amanda Granha Magalhães Gomes e. **O IMPACTO DA DESCANALIZAÇÃO E RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS FLUVIAIS NO MICROCLIMA URBANO**: estudo de caso ribeirão arrudas, belo horizonte (mg). 2019. 124 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SILVA, Amanda Granha Magalhães Gomes e; ASSIS, Wellington Lopes. Impacto da descanalização e restauração de sistemas fluviais no microclima urbano. **Revista Geografias**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 1-21, 31 mar. 2022. Universidade Federal de Minas Gerais - Pro-Reitoria de Pesquisa. <http://dx.doi.org/10.35699/2237-549x.2020.21391>.

SILVA, Ana Carolina *et al.* BELO HORIZONTE: vulnerabilidades e desafios no enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas. **Boletim de Conjuntura (Boca)**, Boa Vista, v. 15, n. 43, p. 244-267, 12 jul. 2023. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.8137243>. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/1661>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SILVEIRA, Marina Pinto Lazarrini *et al.* Valoração econômica ambiental de desastres naturais ocorridos na regional oeste de Belo Horizonte, MG. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-18, 27 mar. 2020. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. <http://dx.doi.org/10.59824/rmrh.v1i1.194>.

SIMONS, Gijis; KOSTER, Reinier; DROOGERS, Peter. **HiHydroSoil v2.0 - High Resolution Soil Maps of Global Hydraulic Properties**. Wageningen: Future Water, 2020. 18 p.

SOLUÇÕES PARA CIDADES. **PROGRAMA DRENURBS**: uma concepção inovadora dos recursos hídricos no meio urbano belo horizonte - MG. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2016. 14 p. Iniciativas Inspiradoras: Saneamento.

SUDS WALES. **SuDS Techniques - Source Control**: permeable pavements. Permeable pavements. Disponível em: <https://www.sudswales.com/types/source-control/permeable-pavements/#:~:text=Permeable%20pavement%20is%20an%20alternative,subsoil%20where%20conditions%20are%20suitable..> Acesso em: 20 set. 2023.

THE WORLD BANK. **Implementing naturebased flood protection**: principles and implementation guidance. Washington: World Bank, 2017. 32 p.

THE WORLD BANK. **Helping Mozambique Cities Build Resilience to Climate Change**. 2018. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2018/06/05/helping-mozambique-cities-build-resilience-to-climate-change#:~:text=Through%20the%20Mozambique%20Cities%20and,in%20the%20risk%20of%20flooding>. Acesso em: 31 out. 2023.

TRENDING CITY. **Pot Plant House, Ho Chi Minh City**. Disponível em: <https://www.trendingcity.org/pot-plant-house>. Acesso em: 31 out. 2023.

UNEP. **Smart, Sustainable and Resilient cities**: the power of nature-based solutions. [S.L.]: UNEP, 2021. 32 p. A working paper for the G20.

UNISDR. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction**: revealing risk, redefining development. Geneva: United Nations Office For Disaster Risk Reduction, 2011. 178 p.

VALENTINI, Marlon Heitor Kunst *et al.* At-site flood frequency analysis in Brazil. **Natural Hazards**, [S.L.], p. 1-18, 2 maio 2023. Research Square Platform LLC. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2841464/v1>.

VENTURA, Luísa Almeida; MOURA, Priscilla Macedo; FERNANDES, Wilson dos Santos. ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DE CURVAS-CHAVES GERADAS PELO MODELO HEC-RAS E SWMM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.

VYLDER, Alexandra de. **Here are some ways the world's cities are rewilding**. 2022. Disponível em: <https://www.rewildingmag.com/here-are-some-ways-the-worlds-cities-are-rewilding/>. Acesso em: 20 set. 2023.

WANG, Lucy. **How the Cheonggyecheon River Urban Design Restored the Green Heart of Seoul**. 2014. Disponível em: <https://inhabitat.com/how-the-cheonggyecheon-river->

urban-design-restored-the-green-heart-of-seoul/cheonggyecheon-river-18/. Acesso em: 17 out. 2023.

WAYCARBON. **ANÁLISE DE VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**: Relatório Final. Belo Horizonte: WayCarbon, 2016. 107 p.

WINKLER, Karina *et al.* HILDA+ Global Land Use Change between 1960 and 2019. **X**, [S.L.]. 2020. PANGAEA. <http://dx.doi.org/10.1594/PANGAEA.921846>.

WRI. **Os 15 países com mais pessoas expostas às inundações causadas pelos rios**. 2015. Disponível em: <https://wricidades.org/noticia/os-15-pa%C3%ADses-com-mais-pessoas-expostas-%C3%A0s-inunda%C3%A7%C3%B5es-causadas-pelos-rios>. Acesso em: 17 ago. 2023.

WOODS-BALLARD, B *et al.* **The SuDS Manual**. London: CIRIA, 2007. 599 p.

WWAP. **SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA A GESTÃO DA ÁGUA**: sumário executivo. 2018. 12 p. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261594_por. Acesso em: 10 maio 2023.

YOHE, Gary. Assessing the Role of Adaptation in Evaluating Vulnerability to Climate Change. **Climatic Change**, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 371-390, 2000. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1005659629316>.

ZOLNIKOV, Tara Rava. Introduction to Climate Change Vulnerability, Adaptation, and Resiliency. In: ZOLNIKOV, Tara Rava (ed.). **Global Adaptation and Resilience to Climate Change**. San Diego: Palgrave Macmillan, 2019. p. 1-145.

ANEXO

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

En el presente anexo se detallan aspectos relacionados con el establecimiento del modelo hidrológico, en particular, la obtención de los mapas de parámetros, así como el enfoque utilizado para la calibración automática y validación.

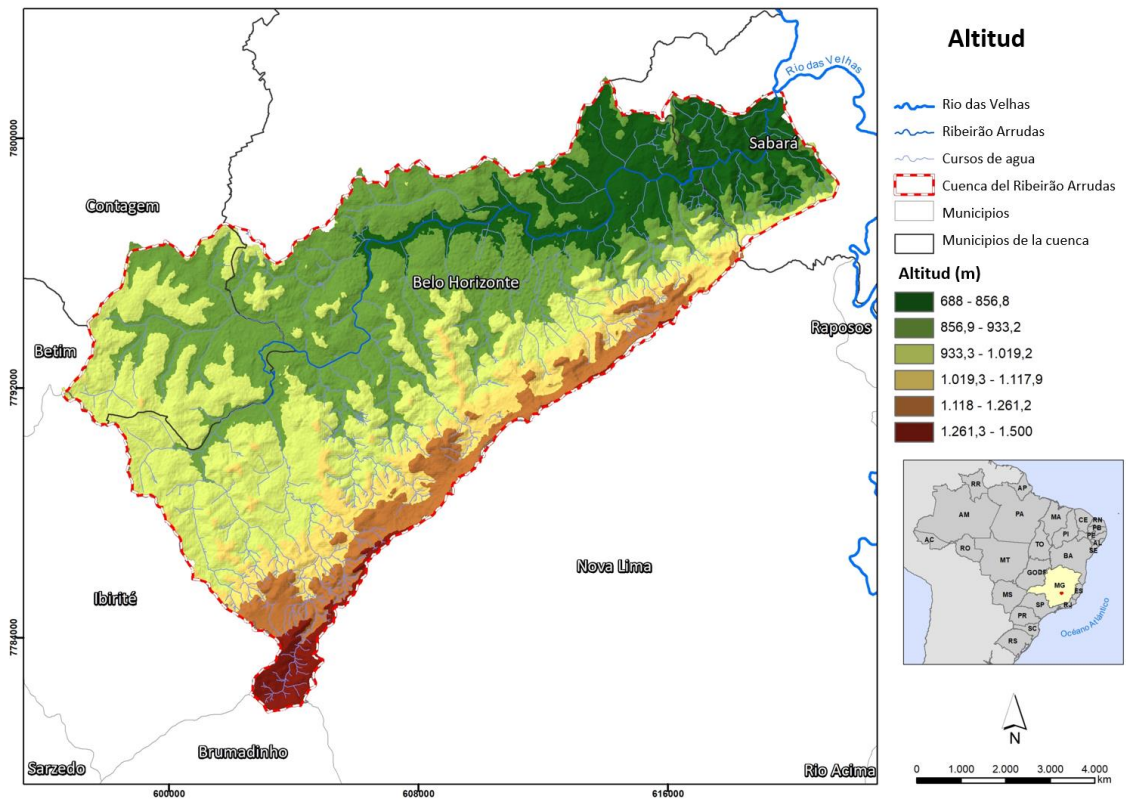
ESTIMACIÓN INICIAL DE PARÁMETROS:

Modelo digital del terreno (MDT) y mapas derivados

Para el presente proyecto se ha considerado el MDT de alta resolución con tamaño de celdas de 12,5 m el cual fue creado desde el mosaico de imágenes ráster del área de estudio descargadas de la misión ALOS-PALSAR¹⁰. Dicho mapa se ha tratado con las herramientas de sistemas de información geográficos disponibles para la corrección de MDT's con fines de modelación hidrológica (e.g. evitar endorreísmos artificiales provocados por el efecto de escala de la representación de la altitud del terreno). Con el uso de la herramienta "Arc Hydro" de "ArcGis Pro 10" se ha realizado un proceso iterativo para la obtención del delineado de cuenca más cercano a la demarcación oficial de la cuenca del Ribeirão Arrudas (PBH, 2019). Finalmente, se ha obtenido el MDT corregido hidrológicamente (FIG. 1) y los mapas derivados: direcciones de flujo (FIG.2) de acuerdo con codificación de Greenlee (1987) y Jenson y Domingue (1988), celdas acumuladas (FIG. 3), pendiente (FIG. 4) y velocidad de flujo en laderas (FIG.5). Para este último mapa, la velocidad se calcula de acuerdo con la expresión sugerida en el Manual de usuario del Modelo TETIS 9.1, la cual parte de la ecuación de Manning.

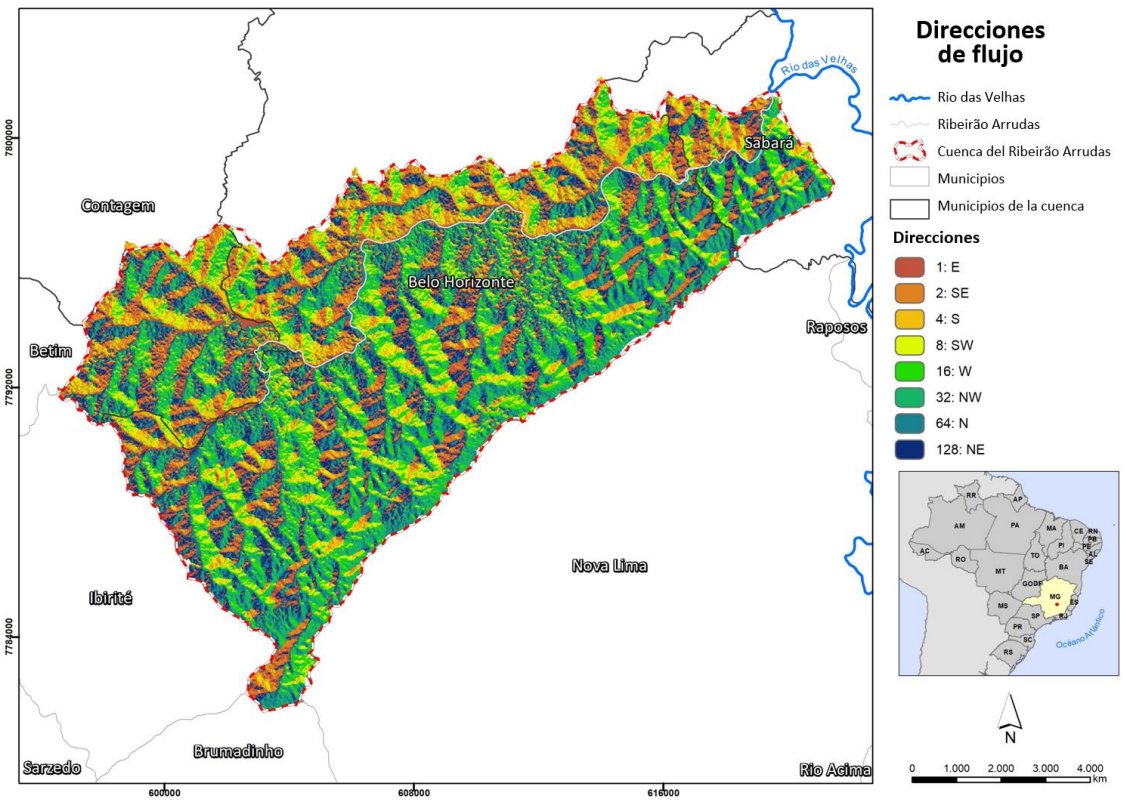
¹⁰ Dataset: © JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2007. Accessed through ASF DAAC 24 August 2023.

Figura 1: Modelo digital del terreno (MDT)



Fuente: Autoría propia

Figura 2: Mapa de direcciones de flujo



Fuente: Autoría propia

Figura 3: Mapa de celdas acumuladas de flujo

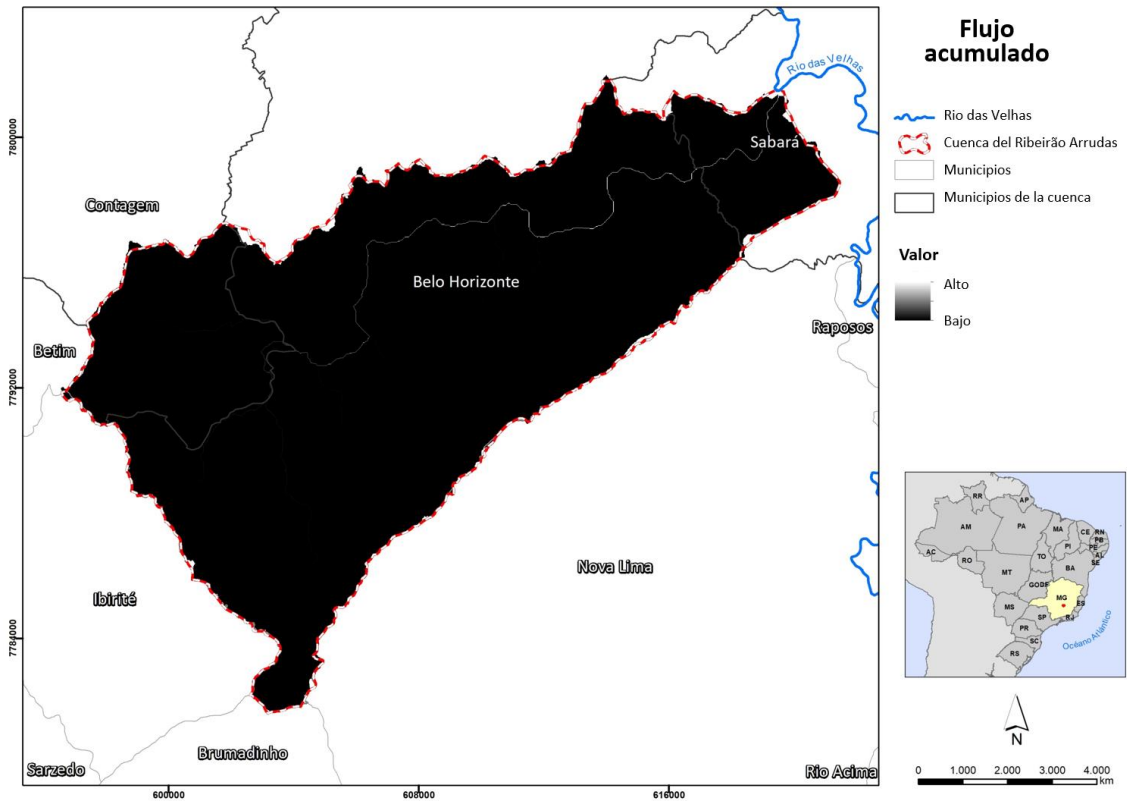


Figura 4: Mapa de pendiente (%)

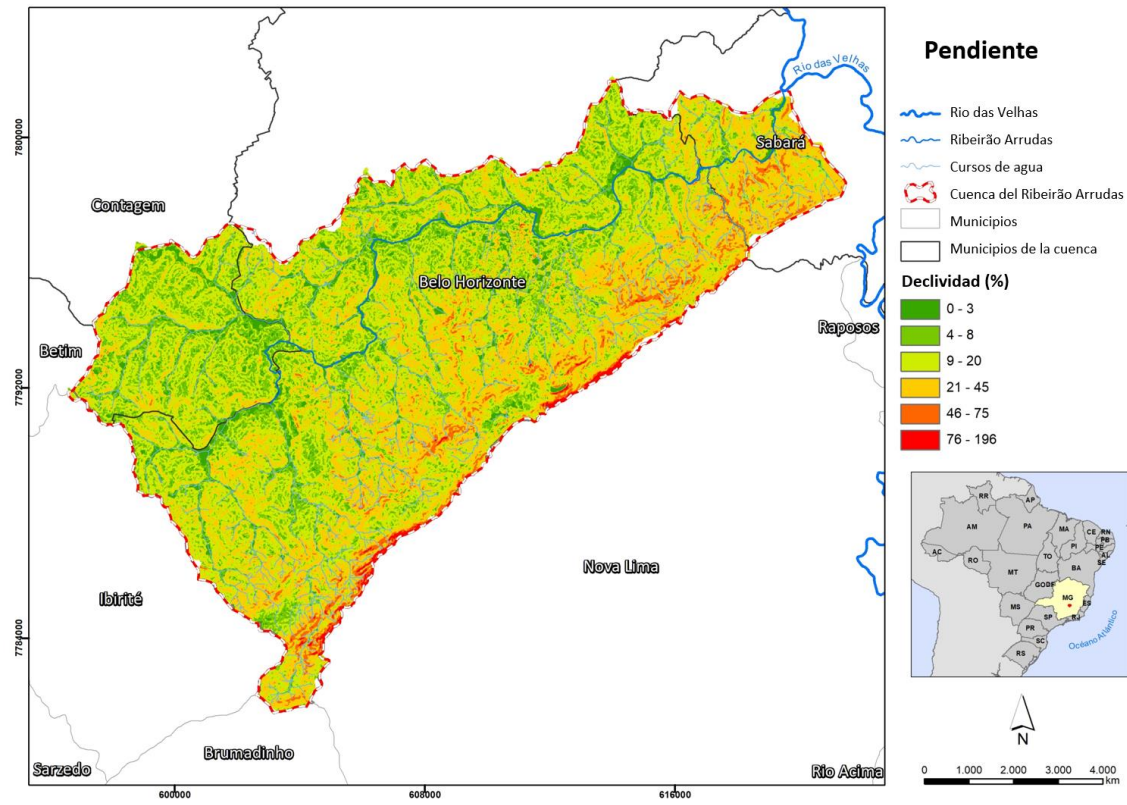
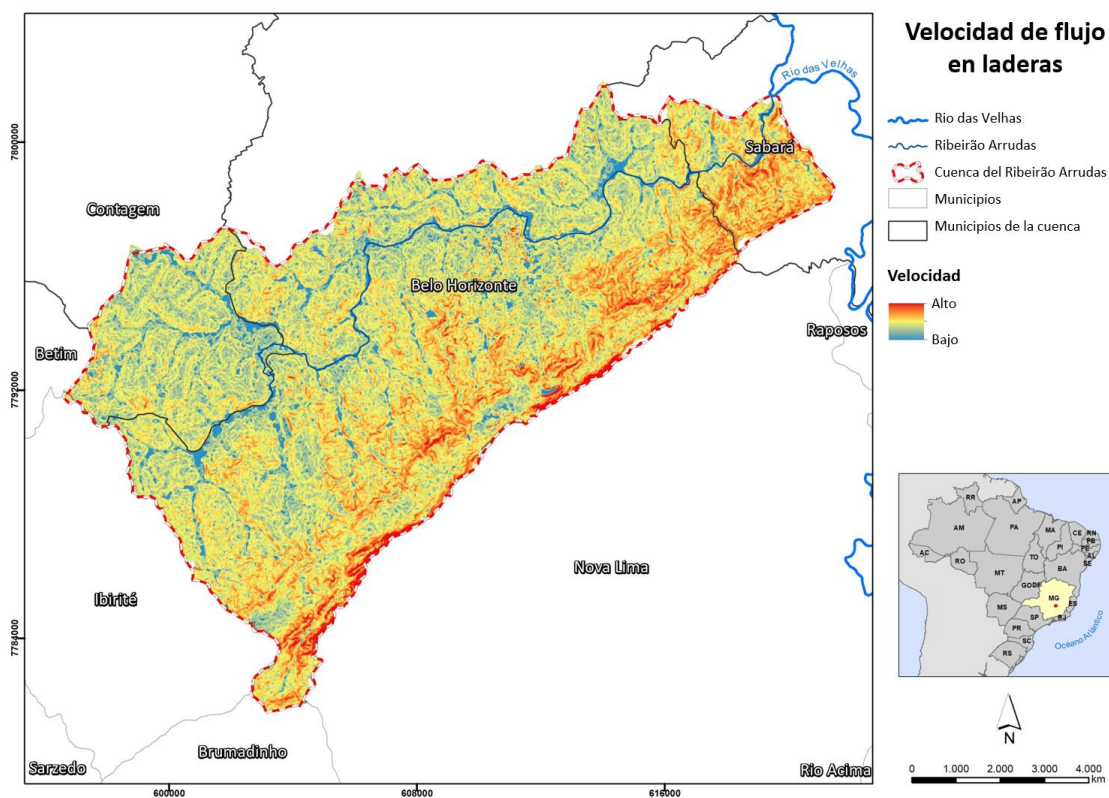


Figura 5: Mapa de velocidad de flujo en ladera (m/s)



Fuente: Autoría propia

Parámetros para el proceso de evapotranspiración

Para la modelación del proceso de evapotranspiración, se ha utilizado el concepto de factor de vegetación, a través del cual se relaciona la evapotranspiración potencial (ETP) (denominación que recibe en este contexto la evapotranspiración de referencia - ET₀) con la evapotranspiración real máxima (ET) de la cobertura del suelo existente, sobre la base de las necesidades hídricas de éstas. La variabilidad espacial se ha representado utilizando las categorías de los mapas históricos de HILDA+ (HILDA+ *Global Land Use Change: HILDAplus_vGLOB-1.0*) de Winkler *et al.* (2020) corregidos con las capas del polígono de superficie urbana histórica de Belo Horizonte para los años 1918, 1935, 1950, 1977, 1999, 2007, 2018. Éstos se han reclasificado en función del comportamiento de la cobertura frente al proceso de evapotranspiración (T_a). La variabilidad temporal se tiene en cuenta a través del uso del factor de vegetación, con el cual se intenta reflejar el comportamiento promedio mensual a lo largo del año siguiendo los valores sugeridos por Burman y Pochop (1994). Dichos mapas fueron corregidos con el trazado de la red de drenaje oficial asumiendo la misma no cambió a lo largo de la historia. Tal hipótesis, si bien no se ajusta con la realidad, es válida para el presente TFM en la medida que el

interés es evaluar el efecto del crecimiento urbano en la hidrología de la cuenca al igual que el efecto de los escenarios de cambio climático y medidas de mitigación basadas en SbN.

Tabla 1: Reclasificación de los mapas históricos para su consideración en TETIS

ID TETIS	CÓD. HILDA+	DESCRIPCIÓN
1	11	Urban (Tejido urbano)
2	33	Pasture/rangeland (Praderas/Pastos)
3	44	Forest (Bosques)
4	55	Unmanaged grass/shrubland (Pastizales naturales/ matorrales)
5	77	Red de drenaje principal del Ribeirão Arrudas (modificado desde la capa oficial)

De acuerdo con la conceptualización de la evapotranspiración básica de TETIS, se considera como parámetro la capacidad máxima de intercepción de agua del grupo funcional de vegetación en condiciones de máximo follaje (I_{max}) y el factor de vegetación o cubierta del suelo (λ_v) que modifica la I_{max} (12 valores mensuales para cada tipo de cubierta) para tener en cuenta la variación de la capacidad máxima de intercepción de agua debido al estado de la cobertura. Los valores se pueden ver en la tabla 1 y se relacionan con el ID de cubiertas y usos del suelo de la tabla 2*a*.

Tabla 2: Valores de factor de vegetación o cubierta del suelo (λ_v) e I_{max}

ID_TETIS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	IMAX
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0
2	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	3,0
3	0,70	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	0,90	0,90	0,90	0,86	0,80	0,73	9,0
4	0,95	0,95	0,95	0,95	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,95	0,95	0,95	3,0
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0

En la figura 6 (tópico 1.5.2) se muestra la evolución histórica de usos y coberturas del suelo de la cuenca del Ribeirão Arrudas.

Características hidráulicas del suelo y subsuelo

La estimación de los parámetros asociados a las características hidráulicas del suelo se ha realizado a partir de la información disponible de varias fuentes de información. A continuación, se presentan las fuentes utilizadas y el proceso de estimación para cada mapa necesario en el modelo TETIS.

Capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo (Hu)

El mapa de Hu representa, de acuerdo con la descripción conceptual del modelo TETIS de *Universitat Politècnica De Valencia* (2021), “*el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto, no hace parte de la escorrentía*”. En tal sentido, aquí se consideran dos tipos de almacenamientos: el que se relaciona al agua que puede evaporarse sin ingresar al suelo (la que se queda en las depresiones del terreno o charcos y la que se intercepta en la vegetación) y el agua retenida por efecto de las fuerzas capilares. Para el primer tipo conocido como mapa de abstracciones o de pérdidas iniciales, la estimación se puede realizar utilizando el mapa de pendientes para el caso de charcos, así como el de usos y coberturas del suelo para el caso de interceptación ya que ésta no se está activando el submodelo de vegetación dinámica (“tanque de interceptación”). En el segundo caso, es necesario inferir la profundidad de suelo donde se almacena el agua disponible para la vegetación, por lo que capas de información útiles pueden ser las de usos y coberturas del suelo (HILDA+ en este caso), profundidad del suelo hasta la roca madre (horizonte R) de SoilGrids y el mapa de contenido de agua disponible derivado de los mapas de capacidad de campo y punto de marchitez de la base de datos HiHydrosoils (WINKLER *et al.*, 2020; HENGL *et al.*, 2017; SIMONS; KOSTER; DROOGERS, 2020).

La capacidad de interceptación de la vegetación (Int)

La Int ha sido estimada considerando los tipos de cobertura y uso del suelo, los cuales se resumen en la Ta. El almacenamiento en superficie (Alm-sup) debido a la rugosidad del terreno, tiene en cuenta dos tipos de encharcamiento: i) el que se produce de acuerdo con la morfología local definida por el uso del suelo (Alm-usos en mm); ii) el que se produce debido a la pendiente del terreno (Alm-Pend en mm). La asignación de los valores de Alm-usos se ha realizado teniendo en cuenta la rugosidad local del terreno, asociada a cada cobertura del suelo (ver Tabla 3). La asignación de los valores de la Alm-Pend se ha realizado asumiendo que, a mayor pendiente, menor posibilidad existe de almacenamiento en depresiones del terreno. Para ello, se ha utilizado el mapa de pendientes derivado del MDT. Se ha asumido una reducción lineal proporcional al 30% de la pendiente local con un valor máximo de almacenamiento de 10mm en zonas planas. A través de un SIG es posible sumar espacialmente los valores de los tipos de

encharcamiento (Alm-Usos+Alm-Pend) para obtener el de almacenamiento en superficie (Alm-sup), el cual a su vez es sumado al de intercepción debido a la vegetación (Int), dando como resultado el mapa de abstracciones iniciales. Dicho mapa se suma al de almacenamiento capilar para obtener el mapa de capacidad de almacenamiento estático en la parte superior del suelo como se describe a continuación.

Para la construcción del mapa de almacenamiento capilar se ha considerado el siguiente procedimiento. En primer lugar, la profundidad de suelo donde se almacena el agua disponible para la vegetación ha sido estimada desde el mapa de profundidad (estimada) del suelo hasta la roca madre (horizonte R) de la base de datos SOILGRIDS y de una reclasificación del mapa de coberturas y usos del suelo de HILDA+ asignando valores de profundidad máxima efectiva de las raíces siguiendo los valores promedio de referencia de la FAO (Allen *et al.* 2006), Canadell *et al.* (1996) y Fan *et al.* (2017). Ver tabla 4.

Tabla 4: Resumen de las categorías y valores utilizados para la consideración de la intercepción y el almacenamiento por rugosidad del suelo

ID_TETIS	CÓDIGOS HILDA+	ALM. RUG. USOS SUELO
1	11	2
2	33	10
3	44	5
4	55	5
5 ¹¹	-	0

A partir de los dos mapas mencionados anteriormente (profundidad hasta el horizonte R y profundidad efectiva de raíces) se generó uno nuevo en el que se realizó una comparación celda a celda de la siguiente manera: si la profundidad del horizonte R es menor que la profundidad efectiva de raíces, se asigna el valor de la profundidad del horizonte R dado que es un condicionante físico; de lo contrario, el valor asignado es el del mapa de profundidad máxima efectiva de raíces. El contenido de agua disponible se ha calculado a partir de la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez para las 7 profundidades de la base de datos HiHydrosoils. Finalmente, el mapa de almacenamiento capilar se ha construido a partir de multiplicar para la profundidad efectiva de raíces del suelo condicionada por el horizonte R, el valor

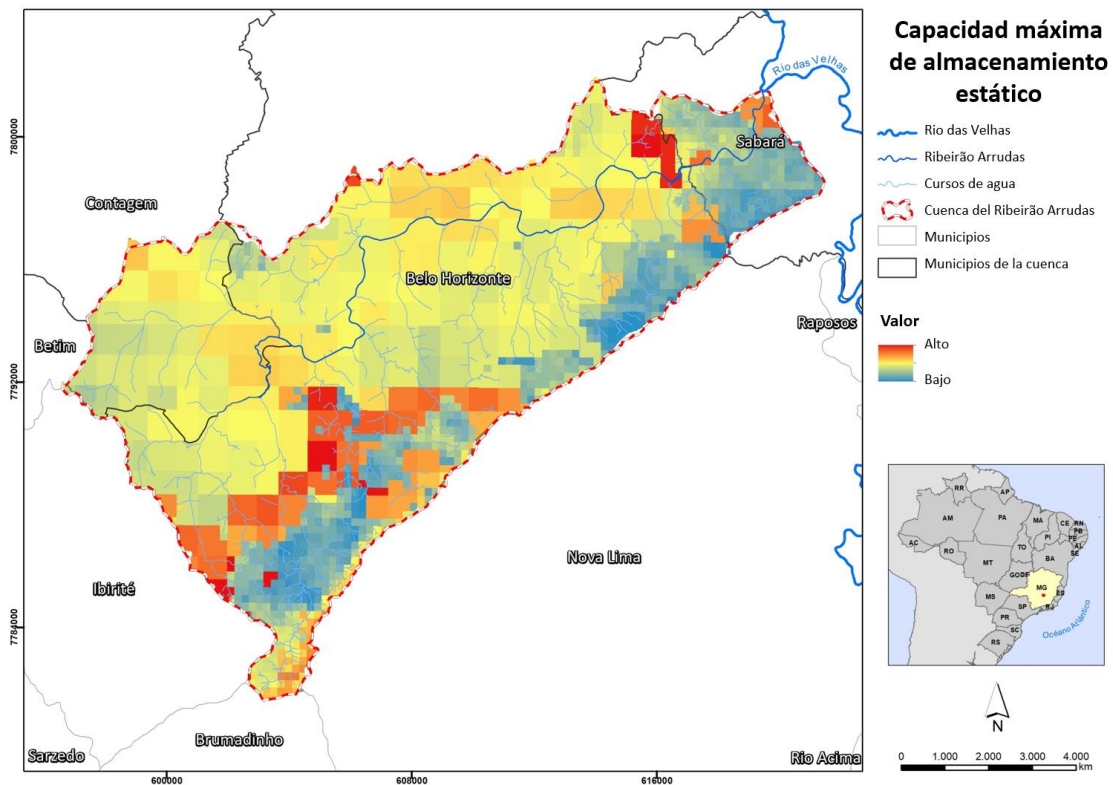
¹¹ Ajuste realizado al mapa sobre la base de la red de drenaje oficial.

correspondiente del contenido de agua disponible correspondiente a esa columna de suelo. Ese último mapa, como ya se ha mencionado, se obtiene desde la diferencia de los mapas de capacidad de campo y punto de marchitez para los diferentes perfiles de suelo.

Capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo (Hu)

Finalmente, ya con los mapas de pérdidas o abstracciones iniciales y el de almacenamiento capilar, su suma es el mapa de capacidad máxima de almacenamiento estático en la parte superior del suelo (Hu), al cual se le pasó un filtro condicionante para convertir en valores de cero las celdas coincidentes con cuerpos de agua naturales y artificiales (ríos, embalses, humedales). Igualmente, se ha incorporado un detalle zonas de parques y jardines de Belo Horizonte y Contagem de la actualidad, el cual ha servido para corregir el mapa de coberturas y usos del suelo incorporando la coincidencia entre uso urbano y dicha capa de detalle, cuya corrección se realizó para todos los mapas históricos (FIG. 6).

Figura 6: Capacidad máxima de almacenamiento estático en la parte superior del suelo (Hu), considerando la cobertura y uso del solo de 2018



Fuente: Autoría propia

Conductividad hidráulica saturada del suelo (Ks/Kss)

Para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo superficial se ha utilizado la base de datos global de 250 m de resolución espacial HiHydrosoils (SIMONS; KOSTER; DROOGERS, 2020). Dicha base de datos consta de las principales características hidráulicas a 7 profundidades de suelo desde 0 hasta 2 metros. Para el presente TFM se consideraron las estimaciones de conductividad hidráulica saturada del suelo Ks para las diferentes profundidades (de 0 hasta 2 m). Para ello se implementó el siguiente procedimiento:

- Recorte para el área correspondiente a la cuenca;
- Reproyección al sistema SIRGAS 2000 UTM Zone 23S;
- Llenado de datos faltantes: resulta útil para eliminar vacíos de información en mapas que por su procedimiento de construcción pueden dejar celdas sin valores que en el presente caso suele ser en las áreas de uso urbano o cuerpos de agua;
- Cambio de tamaño de celdas de 250 a 12,5 m. Al pasar de una celda de mayor tamaño a una de menor se utiliza la interpolación mediante la herramienta “remuestrear” con el método del “vecino más cercano”, el cual realiza una asignación de vecino más cercano. Es el método de interpolación más rápido y el error espacial máximo será la mitad del tamaño de celda;
- Recorte al área de estudio para cada una de las resoluciones espaciales;
- Generación de una sola capa de Ks vertical (capacidad de infiltración) y Ks horizontal (kss) a partir del concepto de conductividad hidráulica equivalente establecido por Leonards (1962) como sigue:

$$K_s = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{K_i}}$$

$$K_{ss} = \frac{\sum m_i K_i}{\sum m_i}$$

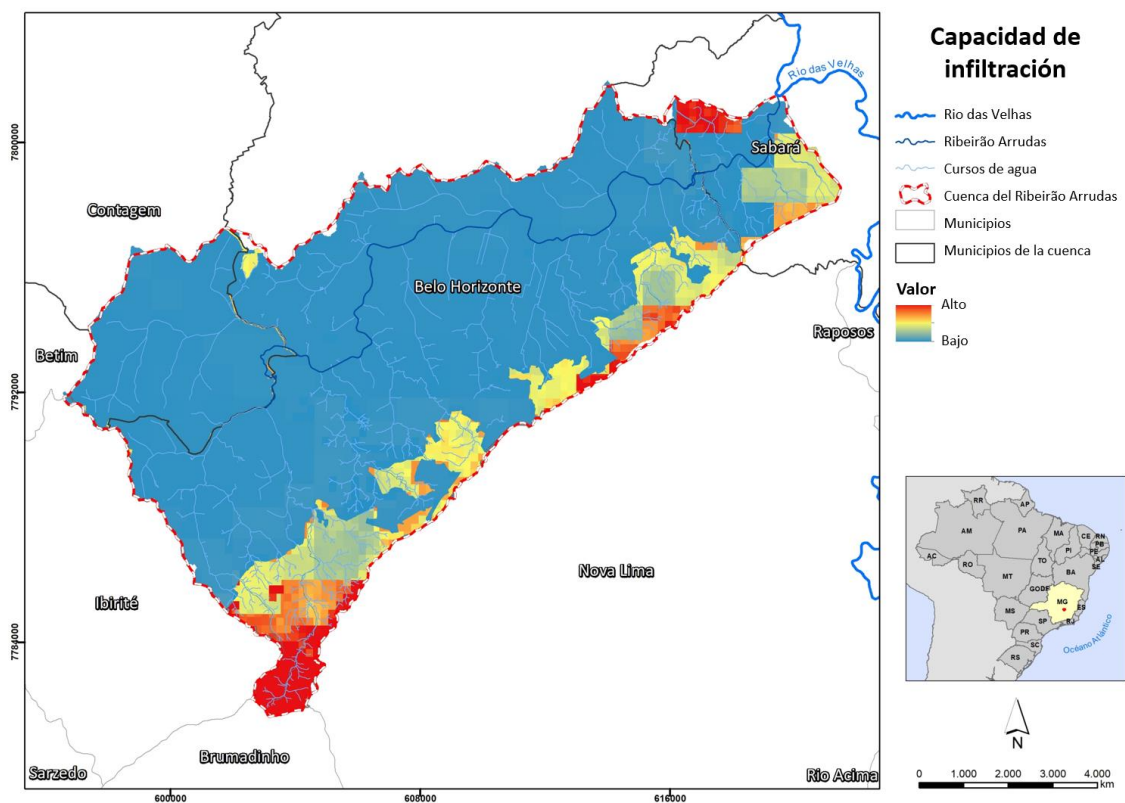
Ks = conductividad hidráulica vertical equivalente para todas las capas
Kss = conductividad hidráulica horizontal equivalente para todas las capas
Ki = conductividad hidráulica de la capa
mi = espesor de capa

Para la consideración de las capas en la estimación, se utilizó como condicionante la existencia del horizonte R antes de la última capa (profundidad de 200 cm);

- Cambio de unidades de “cm/día x 10.000” a “mm/hr”.

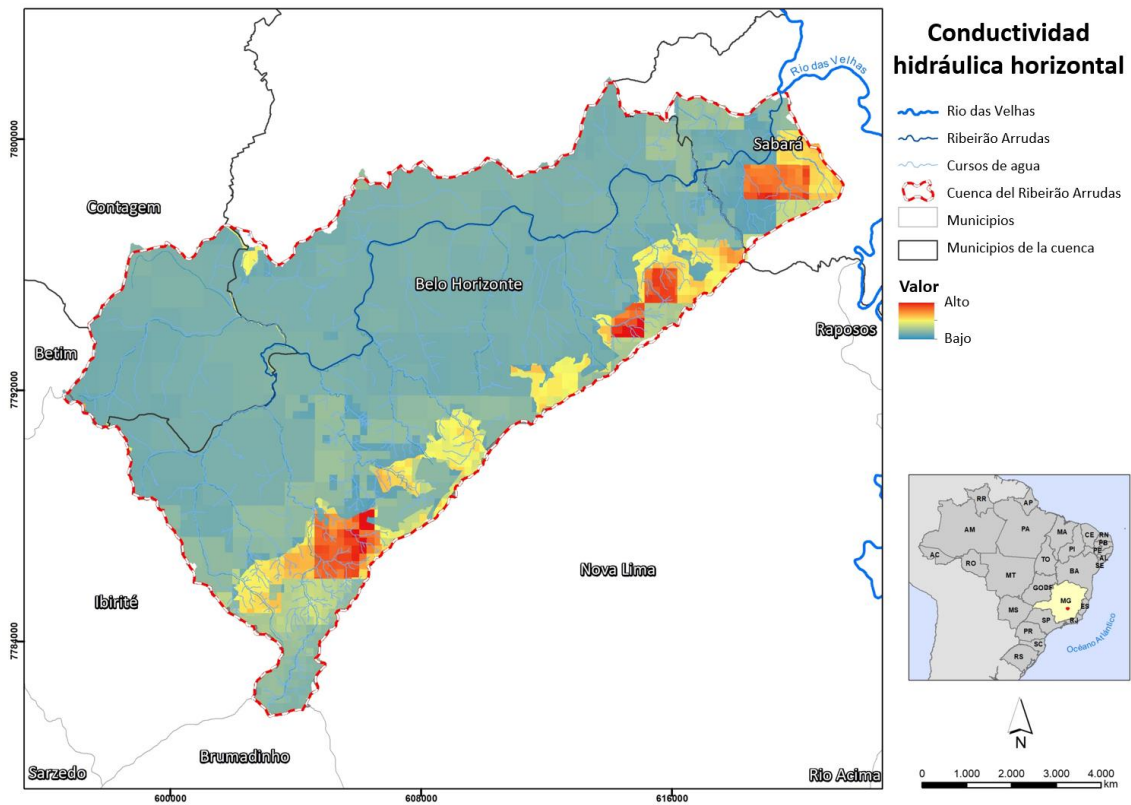
El mapa de conductividad hidráulica saturada vertical del suelo o capacidad de infiltración (K_s) y el de conductividad hidráulica saturada horizontal del suelo (K_{ss}) se muestran en las figuras 7 y 8, respectivamente. A dichos mapas se incorpora igualmente el efecto de la impermeabilización del suelo en la conductividad hidráulica (vertical y horizontal) en las zonas urbanas. Para ello se tiene información histórica del núcleo urbano de Belo Horizonte, el cual también ha sido utilizado en la estimación del mapa de almacenamiento estático en la parte superior del suelo.

Figura 7: Mapa de la capacidad de infiltración (K_s) considerando la cobertura y uso del solo de 2018



Fuente: Autoría propia

Figura 8: Mapa de la conductividad hidráulica horizontal (K_s) considerando la cobertura y uso del suelo de 2018



Fuente: Autoría propia

Conductividad hidráulica saturada del subsuelo ($K_p/K_{sa}/K_{ps}$)

Desde la base de datos HiHydrosoils el valor de la conductividad hidráulica saturada del sub-suelo, a la profundidad de 2m, sirve como referencia para el parámetro del modelo TETIS relacionado con la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación. Dicho valor, que se conoce como capacidad de percolación K_p , se ha tomado como referencia para el presente proyecto teniendo cuenta el tratamiento previo descrito en el anterior apartado.

El mapa de K_{ps} representa la velocidad de percolación en la zona profunda del suelo. En TETIS se contempla la posibilidad de que parte del agua que llega al acuífero no se incorpora al flujo base en la cuenca (lo que se denomina pérdidas a uno u otros acuíferos más profundos). Dicho parámetro se asume como la décima parte del valor de K_p en la medida que suele ser un valor bajo.

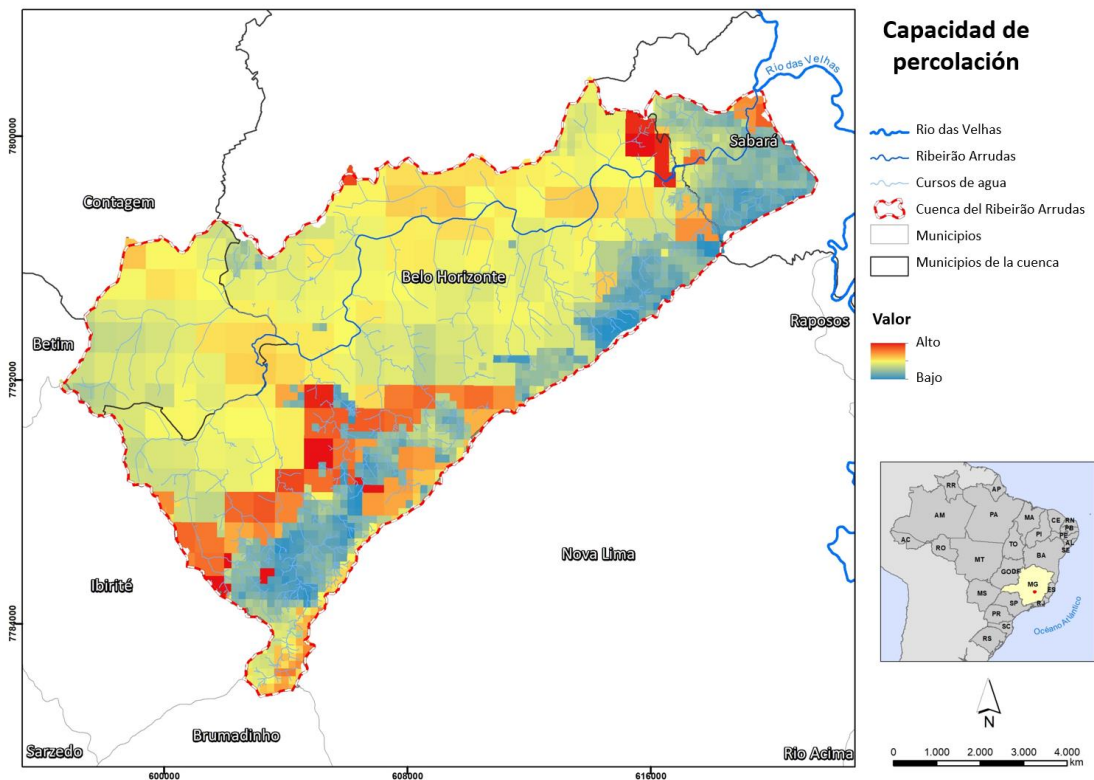
Para la construcción del mapa de conductividad hidráulica saturada horizontal del subsuelo (K_{sa}) se ha utilizado una capa de litología de la zona considerando los valores de referencia disponibles en la literatura. Se consultaron varias tablas de referencia en

Freeze y Cherry (1979), Domenico y Schwartz (1998), Bear (2012), Anderson, Woessner y Hunt (2015) y Fetter (2018). Además, se realizó una búsqueda de publicaciones específicas para la zona de estudio. A partir de ello se pudo obtener la tabla 5 utilizada en el presente estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha obtenido el mapa de K_p y K_{sa} (FIG. 9 y 10).

Tabla 5: Resumen de las referencias utilizadas en la construcción de los mapas K_p y K_{sa}

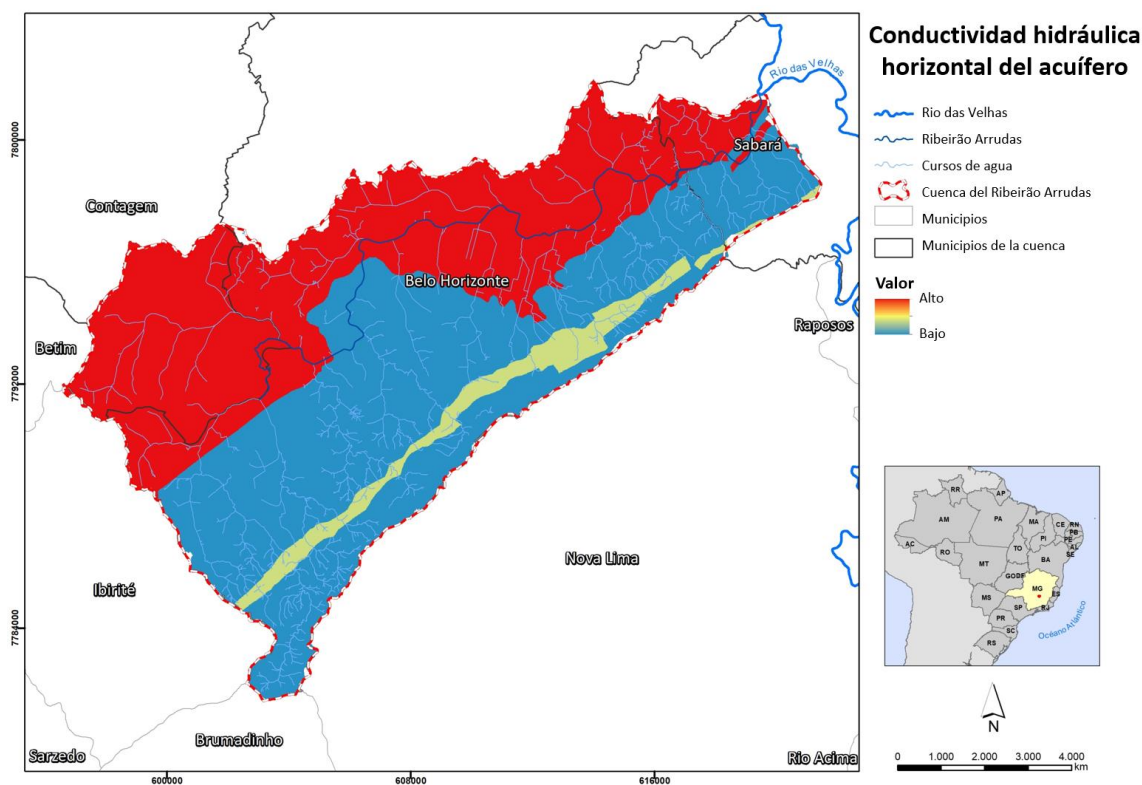
LITOTIPO1	LITOTIPO2	CLASSE_ROC	CLASSE_R_1	Ksat (m/s)	REFERENCIA
Aglomerado, Laterita, Depósitos de arena, Depósitos de arcilla	Depósitos de limo	Ígnea, Sedimentaria (o Sedimentos)	Sedimentaria (o Sedimentos)	0.00000001	Santos y Esquivel (2018)
Itabirito	Dolomita, Filito	Metamórfica	Metamórfica, Sedimentaria (o Sedimentos)	0.00000012	Carneiro, Marques y Chiste-Costa (2015)
Gneis	Granodiorito, Migmatita	Metamórfica	Ígnea, Metamórfica	0.00014	Galvão, Halihan y Hirata (2017)
Filito	Metaconglomerado	Metamórfica	Metamórfica	0.00000006	Gasparon <i>et al.</i> (2012)
Filito, Dolomita, Esquisto		Metamórfica, Sedimentaria (o Sedimentos)		0.000003	Gasparon <i>et al.</i> (2012)
Esquisto, Metagrauvaca	Metatuff	Metamórfica	Metamórfica	0.00000007	Stollberg <i>et al.</i> (2014)

Figura 9: Mapa de capacidad de percolación (K_p)



Fuente: Autoría propia

Figura 10: Mapa de conductividad hidráulica horizontal del acuífero (Ksa)



Fuente: Autoría propia

Parámetros de propagación de la escorrentía

Para la propagación de la escorrentía en TETIS se utiliza la formulación denominada “onda cinemática geomorfológica” (FRANCÉS; VÉLEZ; VÉLEZ, 2007). La propagación de la escorrentía en la cuenca hidrográfica considera que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún cauce perteneciente a la red de drenaje, para circular luego a través de ella hasta la desembocadura. Para ello, en TETIS se emplea el método de la “onda cinemática”, que es una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant al despreciar en la ecuación de conservación de la energía los términos correspondientes a los efectos inerciales y de presión. Respecto a las características hidráulicas de los cauces, éstas se obtienen de la geometría hidráulica la cual es obtenida desde parámetros propios de la cuenca considerando características hidromorfológicas (ej. caudales circulantes, secciones del cauce) que pueden ser por tramos o desde estudios regionales. Aquí se asumieron los valores por defecto que trae el modelo.

CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA

Para realizar la calibración automática, el modelo TETIS tiene implementado el método “*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*” - SCE-UA (ver descripción en DUAN *et al.*, 1994). Dicho método es robusto y eficiente para la calibración de modelos lluvia-escorrentía con amplia trayectoria de uso (ver revisión en NAEINI *et al.*, 2019). A partir de lo establecido en Duan *et al.* (1994), se tienen los siguientes pasos generales del método (GIMHA, 2021):

- 1) Generar una muestra de s puntos aleatorios en el espacio factible y calcular el valor de la función objetivo en cada punto. Si no hay información previa sobre el máximo, entonces utilizar una distribución de probabilidad uniforme para generar la muestra;
- 2) Clasificar los puntos. Ordenar los s puntos en orden decreciente (primero el más pequeño) asumiendo que la meta es minimizar la función objetivo;
- 3) Partición en complejos. Dividir los s puntos en p complejos, de modo que cada uno contenga m puntos. El primer complejo contiene los $p(k-1)+1$ clasificados y el segundo complejo contiene los $p(k-1)+2$ clasificados, y así sucesivamente para los valores de $k=1, \dots, m$;
- 4) Evolución de un complejo. Evolución de cada complejo de acuerdo con un algoritmo de evolución competitiva de complejos, “*Complex Competitive Evolution, CCE*”. El algoritmo CCE está basado en el procedimiento propuesto por Nelder y Mead (1965) para generar descendencia. El CCE utiliza el método Simplex de búsqueda hacia abajo, combinado con la búsqueda aleatoria propuesta por Price (1987) y la evolución competitiva sugerida por Holland (1975). Ver más detalles en Gimha (2021).

CRITERIOS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO

La precisión en la simulación o predicción se expresa con las diferencias entre lo simulado/predicho y lo observado, siendo tales diferencias sistemáticas o aleatorias (LETTENMAIER; WOOD, 1992). En general, la primera medida de desempeño es la inspección visual (e.g. diagramas de dispersión, gráficos de series temporales, curvas) para luego utilizar métricas estadísticas (ver revisiones sobre métricas estadísticas en BENNETT *et al.*, 2013; HARMEL *et al.*, 2014; MORIASI *et al.*, 2015). De acuerdo con

Moriasi *et al.*, (2015) las métricas estadísticas de desempeño recomendadas son las siguientes ya que pueden utilizarse para escalas temporales variadas (diario, mensual y anual) y para la mayoría de las principales variables hidrológicas: R2 (junto con el gradiente b y el intercepto a de la línea de regresión correspondiente), NSE, d , RMSE junto con RSR y PBIAS. Adicionalmente, ha venido ganando relevancia y aceptación el índice de Kling y Gupta (Gupta *et al.*, 2009), el cual se entiende como una mejora del NSE. Dado que el NSE ha sido el utilizado en el presente proyecto, se describe a continuación su formulación.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Siendo O (datos observados) y P (datos predichos/simulados) para un intervalo temporal entre 1 y n pasos de tiempo. El NSE puede moverse entre $-\alpha$ y 1, siendo 1 una modelación perfecta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. **Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport**. 2. ed. Academic Press, 2015. 630 p.

ALLEN, Richard G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Rome: FAO, 2006. (Estudio FAO Riego y Drenaje; 56).

BEAR, Jacob. **Hydraulics of Groundwater**. Dover Publication, 2012. 592 p.

BENNETT, Neil D. *et al.* Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 40, p. 1-20, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>.

BURMAN, Robert D.; POCHOP, L.O. **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**. Amsterdam; New York: Elsevier, 1994. 278 p. (Developments in atmospheric science; 22).

CANADELL, J. *et al.* Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, [S.L.], v. 108, n. 4, p. 583-595, dez. 1996. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00329030>.

CARNEIRO, S. R. C.; MARQUES, E. A. G.; CHISTE-COSTA, J. P. Evaluation of Hydraulic Conductivity of Itabirites of the Alegria Centro and Alegria Sul Open Pits, Samarco Mineração S.A., Minas Gerais State, Brazil. **Mine Water and the Environment**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 136-144, 28 fev. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-015-0328-6>.

DOMENICO, Patrick A.; SCHWARTZ, Franklin W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2. ed. New York: Wiley, 1998. 506 p.

DUAN, Qingyun; SOROOSHIAN, Soroosh; GUPTA, Vijai K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 158, n. 3-4, p. 265-284, jun. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4).

FAN, Ying *et al.* Hydrologic regulation of plant rooting depth. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 114, n. 40, p. 10572-10577, 18 set. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1712381114>.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. Waveland Press, 2018. 598 p.

FRANCÉS, Félix; VÉLEZ, Jaime Ignacio; VÉLEZ, Jorge Julián. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 332, n. 1-2, p. 226-240, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1979. 604 p.

GALVÃO, Paulo; HALIHAN, Todd; HIRATA, Ricardo. Transmissivity of Aquifer by Capture Zone Method: an application in the sete lagoas karst aquifer, mg, brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 89, n. 1, p. 91-102, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720160420>.

GASPARON, Massimo *et al.* Hydrogeology of an arsenic-mineralized fractured phyllite and implications for groundwater arsenic dispersion. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ARSENIC IN THE ENVIRONMENT - AS 2012, 4., 2012, Cairns. **Conference Paper**. London: Crc Press - Taylor & Francis Group, 2012. p. 74-75.

GIMHA. **DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9**. Valencia: Universitat Politècnica De Valencia, 2021. 97 p. Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente.

GREENLEE, David D. Raster and vector processing for scanned linework. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Sioux Falls, v. 53, n. 10, p. 1383-1387, out. 1987.

GUPTA, Hoshin V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 377, n. 1-2, p. 80-91, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

HARMEL, R.D. *et al.* Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: a review and recommendations. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 57, p. 40-51, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.013>.

HENGL, Tomislav *et al.* SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. **Plos One**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1-40, 16 fev. 2017. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>.

HOLLAND, John H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT Press, 1992. 232 p.

IGME (2010). Mapa de permeabilidades de España a escala 1:200.000:: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&Id=15&language=es>

JENSON, Susan K.; DOMINGUE, Julia O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Sioux Falls, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, nov. 1988.

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 13-24, mar. 1986. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626668609491024>.

LETTERNMAIER, D. L.; WOOD, E. F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT, David R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, INC., 1993. Cap. 26. p. 26.1-26.29.

LEONARDS, G. A. **Foundation Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1962. 1136 p.

MORIASI, Daniel *et al.* Hydrologic and Water Quality Models: performance measures and evaluation criteria. **Transactions Of The Asabe**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 30 dez. 2015. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10715>.

NAEINI, Matin Rahnamay *et al.* Three decades of the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) optimization algorithm: review and applications. **Scientia Iranica**, v. 26, p. 2015-2031, jul. 2019.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 308-313, 1 jan. 1965. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 282-290, abr. 1970. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

PRICE, W. L. Global optimization algorithms for a CAD workstation. **Journal Of Optimization Theory and Applications**, [S.L.], v. 55, n. 1, p. 133-146, out. 1987. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00939049>.

SANTOS, Roberto Aguiar dos; ESQUIVEL, Edmundo Rogério. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. **Journal Of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 986-991, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.005>.

SIMONS, Gijs; KOSTER, Reinier; DROOGERS, Peter. **HiHydroSoil v2.0 - High Resolution Soil Maps of Global Hydraulic Properties**. Wageningen: Future Water, 2020. 18 p.

STOLLBERG, Reiner *et al.* Protection and exploitation of groundwater resources in Western Central Brazil. In: LORZ, Carsten. **Integrated Water Resource Management in Brazil**. London: IWA, 2014. Cap. 3. p. 23-48.