

EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E JARDINS DE CHUVA COMO ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO HIDROLÓGICA URBANA NA BACIA DO RIO TRAPICHEIROS, RIO DE JANEIRO

Wendel Henrique Santos de Souza ¹ ; Diego Sebastian Carvalho de Souza ² & Alfredo Akira

Ohnuma Júnior ³

RESUMO – Este estudo avaliou os índices climáticos extremos de precipitação na bacia do rio Trapicheiros, localizada no bairro da Tijuca, Rio de Janeiro, utilizando séries históricas processadas pelo software RCLimindex. Foram analisados índices relacionados à intensidade, frequência e duração das chuvas extremas entre 2003 e 2024. Os resultados indicaram aumento nos eventos de precipitação intensa, principalmente nos anos de 2010, 2020 e 2023, elevando os riscos de alagamentos e sobrecarga da drenagem urbana. Embora os testes estatísticos não tenham identificado tendências significativas ao nível de 5%, observou-se comportamento indicativo de intensificação das chuvas extremas. Como medida mitigadora, foi proposto o dimensionamento de jardins de chuva como Solução Baseada na Natureza, demonstrando potencial para redução do escoamento superficial e aumento da resiliência urbana.

Palavras-Chave – Extremos climáticos; Drenagem urbana; Jardins de chuva

ABSTRACT– This study evaluated extreme precipitation climate indices in the Trapicheiros River basin, located in the Tijuca neighborhood, Rio de Janeiro, using historical rainfall series processed with the RCLimindex software. Indices related to the intensity, frequency, and duration of extreme rainfall events were analyzed between 2003 and 2024. The results indicated an increase in intense precipitation events, especially in 2010, 2020, and 2023, increasing the risks of urban flooding and overload of the drainage system. Although the statistical tests did not identify significant trends at the 5% significance level, the results suggest signs of intensification of extreme rainfall events. As a mitigation strategy, the study proposed the design of rain gardens as a Nature-Based Solution, demonstrating potential to reduce surface runoff and improve urban resilience.

Key-words – Climate extremes; Urban drainage; Rain gardens

INTRODUÇÃO

Segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, eventos pluviométricos extremos tendem a se tornar mais intensos e mais frequentes em diversas regiões tropicais e

1) Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – DEAMB/UERJ. E-mail: souza.wendel@posgraduacao.uerj.br

2) Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – DEAMB/UERJ. E-mail: sdscs.gp@gmail.com

3) Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. E-mail: akira@eng.uerj.br

subtropicais ao longo do século XXI, especialmente em áreas urbanas altamente antropizadas. Tais alterações impactam diretamente a segurança hídrica, a infraestrutura urbana e a resiliência das cidades frente aos eventos hidrológicos extremos (IPCC, 2021).

Diante dessa problemática, o monitoramento e a análise de índices climáticos extremos vêm assumindo papel estratégico nos estudos hidrológicos e climáticos. Os índices desenvolvidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) permitem avaliar alterações na intensidade, frequência e duração de eventos extremos de precipitação, fornecendo importantes subsídios para estudos de adaptação climática e planejamento urbano sustentável. Entre esses índices destacam-se o RX1day, RX5day, R99p, PRCPTOT e SDII, amplamente utilizados em pesquisas internacionais voltadas à identificação de tendências hidrológicas associadas às mudanças climáticas (ALEXANDER et al., 2006; DONAT et al., 2013).

Uma das ferramentas mais utilizadas para análise de extremos climáticos é o software RCLimindex, desenvolvido para processamento de séries históricas meteorológicas com base nos critérios do ETCCDI. O software possibilita a obtenção padronizada de índices climáticos extremos, permitindo avaliar tendências hidrológicas e alterações nos regimes de precipitação em diferentes escalas espaciais e temporais. Sua ampla utilização em estudos internacionais demonstra elevada confiabilidade na identificação de mudanças associadas ao aquecimento global e à intensificação de eventos extremos (ZHANG; YANG, 2004).

Paralelamente ao avanço das análises climáticas, cresce mundialmente a adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) como estratégia de adaptação climática e mitigação dos impactos hidrológicos urbanos. Entre as principais técnicas aplicadas à drenagem urbana destacam-se: jardins de chuva, biovaletas, pavimentos permeáveis, telhados verdes e wetlands construídos.

Os jardins de chuva, especificamente, têm sido amplamente empregados como técnica compensatória de drenagem urbana, atuando na retenção temporária, infiltração e amortecimento dos picos de escoamento superficial. Estudo de Fletcher et al. (2015) demonstram elevada eficiência dessas estruturas na redução do volume escoado, no controle da poluição difusa e na melhoria da resiliência urbana frente aos eventos extremos de precipitação.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dos índices climáticos extremos de precipitação na região da bacia do rio Trapicheiros, utilizando séries históricas pluviométricas processadas no software RCLimindex, bem como propor o dimensionamento de jardins de chuva como Solução Baseada na Natureza aplicada ao controle quantitativo do escoamento superficial urbano.

METODOLOGIA

Características da Área de Estudo

O Rio Trapicheiros, um dos principais eixo de drenagem da região da Tijuca, nasce na Reserva Florestal da Tijuca e percorre 5,9 km até desaguar no Rio Maracanã, próximo à Praça da Bandeira (FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS, 2020), conforme Figura 1.

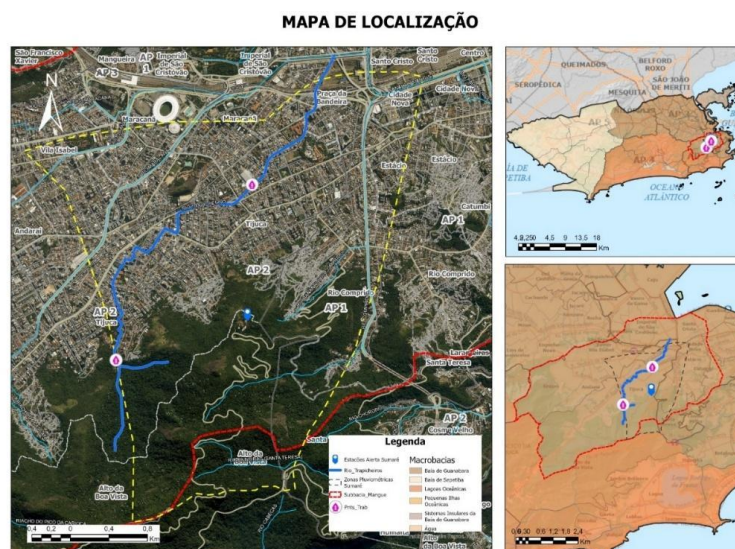


Figura 1 - Localização do Rio trapicheiros. DATA RIO, 2019.

A área de intervenção proposta para aplicação da SbN concentra-se ao longo do trecho da avenida Heitor Beltrão, no bairro da Tijuca (Figura 2), em seção do médio Trapicheiro, local selecionado por recorrentes episódios de alagamentos e enchentes, além de área pública e espaços disponíveis compatíveis com a técnica.



Figura 2 - Localização de trecho da Av. Heitor Beltrão. Os Autores, 2026.

Índices Extremos de Precipitação

Os índices de extremos climáticos de precipitação foram obtidos da estação pluviométrica de São Cristóvão do sistema ALERTA RIO, devido a representatividade dos dados fornecido e por estar

próxima da área de estudo e também em ambiente urbano e processados pelo software RClimdex para uma série histórica de 2003 a 2024.

As tabelas fornecem indicadores anuais sumarizados, assim como suas respectivas médias e desvios padrão para o período.

Os índices climáticos extremos consistem em métricas estatísticas desenvolvidas para quantificar alterações na frequência, intensidade e duração de eventos meteorológicos extremos.

O conjunto de dados foi processado com base nos critérios do ETCCDI, extraíndo 10 índices focados em precipitação (como CDD, PRCTOT, R99p, RX1day, entre outros).

Aplicação de SbN na Drenagem Urbana

Como estratégia de mitigação dos impactos hidrológicos urbanos, foi proposta a aplicação de jardins de chuva nas margens do rio Trapicheiros.

O dimensionamento hidráulico considerou os critérios da RIO-ÁGUAS (2019), utilizando a equação IDF da estação Sabóia Lima para um período de retorno de 10 anos, conforme descrita na Equação 1.

$$i = \frac{aT^b}{(t+c)^d} \quad (1)$$

Onde: i = intensidade da chuva (mm/h); T = período de retorno (anos); t = duração da chuva (min); e a , b , c e d são os parâmetros da equação, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de chuvas IDF Sabóia Lima

Pluviômetro	a	b	c	d	Fonte
Sabóia Lima	1782,000	0,170	16,600	0,841	Rio-Águas (2006)

Fonte: Adaptado de RIO-ÁGUAS (2019).

Adotou-se o Método Racional para estimativa das vazões de projeto, descrito pela Equação 2.

$$Q = \frac{C \times i \times (A)^{-10^3}}{3600} \quad (2)$$

Onde: Q = deflúvio gerado em m^3/s ; A = área de contribuição em m^2 ; i = intensidade de chuva em mm/h; e C = coeficiente de escoamento superficial (runoff);

Este estudo também utilizou a metodologia Rain Envelope Method ou Curva Envelope, para o dimensionamento do jardim de chuva, adaptado aos critérios de volume de armazenamento de trincheiras de infiltração (GONDIM, 2024).

Portanto, o volume de entrada corresponde ao volume precipitado (Equação 3).

$$V_{ent} = V_{prec} = Q \times t \quad (3)$$

Onde: V_{ent} = volume de entrada em m^3 ; V_{prec} = volume precipitado em m^3 ; Q = vazão de projeto em m^3/s ; e t = tempo de chuva em s;

Dessa forma, foi obtido o volume de armazenamento de água de chuva no jardim, em função do volume precipitado efetivo e o volume infiltrado (Equação 4).

$$V_{arm} = V_{prec} - V_{inf} \quad (4)$$

Onde: V_{arm} = volume de armazenamento; V_{prec} = volume precipitado; V_{inf} = volume infiltrado

O volume infiltrado (Equação 5) considera as dimensões do jardim e a infiltração acumulada, o que se assemelha ao dimensionamento de uma trincheira de infiltração (Ohnuma Jr e Mendiondo, 2015).

$$V_{inf} = (H \times L) \times I_{ac} \quad (5)$$

Onde: V_{inf} = volume infiltrado; H = altura da trincheira em metros; L = comprimento da trincheira em metros; I_{ac} = Infiltração acumulada.

A infiltração acumulada é caracterizada pelo produto entre a sortividade do solo (associada a um fator de segurança) pela raiz quadrada do tempo da chuva de projeto (Equação 6).

$$I_{ac} = S' \times \sqrt{t} \quad (6)$$

Onde: I_{ac} = infiltração acumulada, em m^3/m^2 ; S' = sortividade do solo com aplicação do fator de segurança, em $m^3/s.m^2$, e t = tempo de chuva, em segundos.

Segundo Vasconcellos (2022) a sortividade é uma variável que descreve um aspecto de interação água-solo, portanto, depende de atributos dos dois elementos e deve ser associada a um fator de segurança, pois devido ao acúmulo de finos na interface do solo com o passar do tempo existe diminuição da capacidade de infiltração. Para este trabalho, foi considerado o valor de sortividade de $0,00069 m^3/s.m^2$, encontrado por Vasconcellos (2022).

As taxas de redução da taxa de infiltração foram sugeridas por CIRIA (1996), em relação a área de contribuição e ao grau de impacto da estrutura (Tabela 2).

Tabela 2 - Fatores de segurança de minoração da sortividade

Área (m^2)	Sem prejuízo	Pouco prejuízo	Muito prejuízo
<100	1,5	2	10
100 a 1000	1,5	3	10
>1000	1,5	5	10

Fonte: CIRIA, 1996.

Para fins de dimensionamento, a sortividade em função do fator de segurança é dada pela Equação 7.

$$S' = \frac{S}{FS} \quad (7)$$

Onde: S' = sortividade do solo com aplicação do fator de segurança, em $m^3/s.m^2$; S = sortividade do solo experimental, em $m^3/s.m^2$, e FS = Fator de segurança.

O volume do jardim de chuva é obtido pela razão entre o volume de armazenamento e a porosidade da brita (Equação 8).

$$V_{jdc} = \frac{V_{arm}}{\phi_b} = H \times l \times b \quad (8)$$

Onde: V_{jdc} = volume do jardim de chuva; V_{arm} = volume armazenado em m^3 ; ϕ_b = porosidade da brita; H = altura do jardim de chuva em metros; L = comprimento do jardim de chuva em metros; b = base do jardim de chuva em metros.

Por fim, com base no valor do volume do jardim de chuva e as dimensões L e H pré estabelecida. Pode-se calcula a largura da base (b) da trincheira, determina-se o volume do prisma que representa a trincheira de infiltração do jardim de chuva:

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise de extremos climáticos pluviométricos

Após modelagem computacional os resultados anuais dos índices de extremos climáticos de precipitação pelo *software* RClimDex, estão descritos na Tabela 3

Tabela 3 - Índices de extremos climáticos de precipitação.

Ano	CDD (dias)	CWD (dias)	PRCTOT (mm)	R10 (dias)	R20 (dias)	R30 (dias)	R99p (mm)	RX1day (mm)	RX5day (mm)	SDII (mm/dia)
2003	22	7	1184,4	37	16	11	74,2	74,2	179,4	12,47
2004	32	7	929,2	35	11	5	84,6	84,6	84,6	9,89
2005	35	7	1193,4	33	17	12	0	66	123	11,7
2006	30	6	891,8	25	13	5	106,2	106,2	146,4	9,91
2007	28	5	853,8	22	11	6	146,4	146,4	181,8	11,23
2008	28	9	1091,6	35	13	7	0	47,4	111,4	9,33
2009	13	7	1227	39	17	11	88	88	135	10,31
2010	30	7	1378,4	38	20	9	321,6	118,8	298,2	14,51
2011	25	7	941,8	29	10	7	115	115	210,8	10,35
2012	22	5	741,6	21	10	4	0	63,4	83,4	9,76
2013	35	9	1130,4	36	17	11	0	68,2	113,2	10,97
2014	30	4	500	17	5	2	0	44,4	59,2	7,69
2015	41	4	705	27	10	3	0	64,4	75,2	9,4
2016	25	9	1089	34	19	10	86	86	119,4	13,12
2017	28	4	686	21	7	3	0	59	90,6	7,98
2018	24	5	1079,8	32	13	9	163	90,8	131,4	12,27
2019	28	7	1221,4	33	22	13	154,4	79,6	180,6	13,89
2020	21	7	1515,6	40	20	13	288	206	298	15,31
2021	34	4	996,8	28	17	7	96,6	96,6	140,8	11,2

2022	32	7	1104,6	29	14	9	232,4	133,8	235,8	13,31
2023	31	5	1290	40	23	12	134,6	134,6	228,2	14,33
2024	30	6	926	33	14	8	0	58,6	114	12,51
Média	28,4	6,3	1030,8	31,1	14,5	8	95	92,4	151,8	11,4
Desvio Padrão	5,9	1,6	243,4	6,7	4,8	3,4	95,9	38,3	67,7	2,1
Tau de Kendall	0,04	-0,19	0,03	-0,02	0,16	0,10	0,15	0,10	0,12	0,24
Valor-p	0,82	0,21	0,87	0,93	0,29	0,51	0,32	0,54	0,46	0,13
Inclinação de Sen	0	0	2	0	0,18	0,07	0,71	0,91	0,13	0,12

Notas: CDD = dias secos consecutivos, CWD = dias úmidos consecutivos, PRCTOT = precipitação total anual, R10 = número de dias em que precipitação é maior ou igual a 10 mm, R20 = número de dias em que precipitação é maior ou igual a 20 mm, R30 = número de dias em que precipitação é maior ou igual a 30 mm, R99p = precipitação total anual quando maior que o 99º percentil, RX1day = precipitação máxima de 1 dia, RX5day = precipitação máxima de 5 dias consecutivos e SDII = intensidade simples diária.

Fonte: Os Autores, 2026.

A maioria dos índices apresentou inclinação mediana de Sen positiva, indicando tendência estimada de aumento, especialmente em variáveis associadas à intensidade e aos acumulados extremos de precipitação, como por exemplo a tendência anual RX1day (Figura 3).

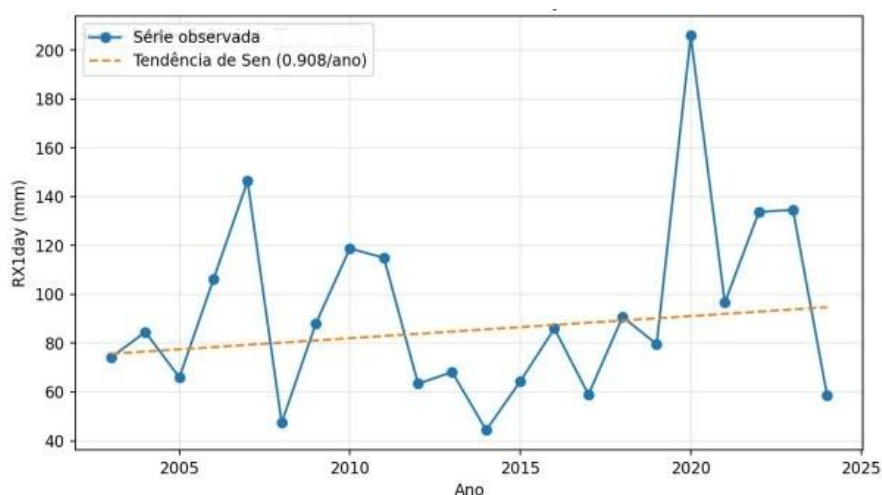


Figura3 - Tendência anual do índice RX1day. O Autores, 2026

Entretanto, no nível de 5% de significância, nenhuma tendência foi estatisticamente significativa pelo teste de Mann-Kendall. Isso significa que os sinais de aumento devem ser interpretados como indícios exploratórios para a série analisada, e não como confirmação estatística robusta de mudança monotônica no período.

Os valores máximos de RX1day alcançaram 206 mm em 2020, enquanto o índice RX5day atingiu 298 mm no mesmo ano. Esses resultados demonstram a ocorrência de eventos extremos de

elevada magnitude, capazes de produzir intensa geração de escoamento superficial em curto intervalo temporal.

O índice R99p apresentou valores expressivos em 2010 (321,6 mm), 2020 (288 mm) e 2022 (232,4 mm), indicando aumento da contribuição de chuvas extremamente intensas para o total anual precipitado.

Eventos associados a elevados valores de RX1day e RX5day possuem elevada capacidade de produzir aumento significativo das vazões do rio e por consequência alagamentos urbanos.

Além disso, os índices CWD e CDD evidenciam alternância entre períodos secos prolongados e episódios intensos de precipitação concentrada, facilitando o processo de colmatagem dos vazios. Esse comportamento tende a reduzir a capacidade inicial de infiltração do solo urbano, favorecendo o aumento do coeficiente de escoamento superficial durante eventos críticos.

Dimensionamento Jardins de Chuva

A intensidade pluviométrica calculada com base na Equação 1, referente ao tempo de concentração recomendado de 10 minutos e os coeficientes da IDF da estação Sabóia Lima, disponibilizados pela RIO-ÁGUAS (2019) foram extraídos da Tabela 1.

Para um tempo de retorno de 10 anos, obteve-se uma intensidade pluviométrica de cerca de 166,95 mm/h.

Para o dimensionamento da vazão de projeto pelo Método Racional, foi considerado um coeficiente de escoamento superficial de 0,80, conforme tipologia de área de drenagem (RIO ÁGUAS, 2019) e uma área total de drenagem considera as duas margens do rio de 16.894 m². Logo, obteve-se uma vazão de 0,6268 m³/s.

A Tabela 4 apresenta os critérios e parâmetros adotados no dimensionamento do jardim de chuva.

Tabela 4 – Parâmetros de dimensionamento do jardim de chuva

Parâmetro	Valor	unid	Observação
FS	5		Área maior que 1000 m ²
S	0,00069	m ³ /s.m ²	Dados da literatura
S'	0,000138	m ³ /s.m ²	Calculado
t	600	s	Estimado
Iac	0,00338	m ³ /m ² ;	Calculado
H	1	m	Estimado
L	320	m	Estimado
Vinf	1,08	m ³	Calculado
Vprec	376,06	m ³	Calculado

Varm	374,98	m ³	Calculado
Øb	0,45		Estimado
Vjdc	833,29	m ³	Calculado
b	2,6	m	Calculado

Fonte: Os Autores, 2026.

Os resultados obtidos estimam um jardim de chuva com dimensões de 1,00 m de profundidade por 320 m de comprimento e 2,60 m de largura. Como dimensionado para áreas de contribuições a partir das vias marginais, propõem-se jardins laterais ao curso d'água do rio Trapicheiro em condições similares, relacionados a capacidade de armazenamento, declividade de fundo e escoamento, ou seja, sua largura deve ser dividida por 2 para ser aplicável em cada margem do rio Trapicheiro, ficando com cerca de 1,30 m de base.

A técnica de jardim de chuva dimensionada vai servir como um reservatório de retenção e amortecimento das chuvas, pois sua capacidade de infiltração calculada de 1,08 m³ corresponde apenas 0,3% da sua capacidade de armazenamento.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que os índices climáticos extremos calculados pelo RClimdex constituem importante ferramenta para avaliação da dinâmica hidrológica urbana em bacias densamente urbanizadas.

A análise dos índices pluviométricos evidenciou aumento da intensidade e frequência de eventos extremos de precipitação, sobretudo associados aos índices RX1day, RX5day, R99p e SDII.

Esses eventos apresentam elevada capacidade de desencadear eventos extremos na drenagem urbana da bacia do rio Trapicheiros.

Contudo, nenhuma tendência foi estatisticamente significativa, ou seja, os sinais de aumento devem ser interpretados apenas como indícios exploratórios para a série histórica analisada.

A integração dessas análises com o dimensionamento de Soluções Baseadas na Natureza apontou a viabilidade técnica dos jardins de chuva para amortecimento dos picos de escoamento.

Tais conclusões reiteram a urgência do desenvolvimento de políticas de adaptação climática por parte da gestão pública municipal, através da ampliação da infraestrutura verde, modernização da macrodrenagem e planejamento urbano sustentável para a região.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Lisa V. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 111, n. D5, p. 1–22, 2006.

CIRIA – CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION. Control of Risk. A guide to the systematic management of risk from construction. 1996.

DONAT, Markus G. et al. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: the HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Washington, v. 118, n. 5, p. 2098–2118, 2013.

FLETCHER, Tim D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, London, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS. Um manual dos rios, canais e corpos hídricos da cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Prefeitura do Rio de Janeiro, 2020.

GONDIM, Fabio Ribeiro. Jardins de chuva: uma análise teórica e experimental para a implementação no Brasil. 2024. 192 f, Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental— Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

OHNUMA JR, A. A.; MENDIONDO, E. M. Metodologia Para Cálculo de Eficiência de Técnicas Compensatórias Em Lote Urbano. *Revista Internacional de Ciências*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 29–41, 2015.

RIO-ÁGUAS (2019). Fundação Rio-Águas. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. Disponível em: <<https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVISA01.pdf>>. Acesso em 28 de abril de 2026.

VASCONCELLOS, C. F. Estudo dos jardins de chuva como ferramenta de adaptação urbana às mudanças climáticas: parâmetros para dimensionamento e projeto na cidade de Niterói, 2022. 80 p. Dissertação (graduação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

ZHANG, Xuebin; YANG, Feng. RCLimDex (1.0) User Guide. Downsview: Climate Research Branch Environment Canada, 2004.