

Avaliação do potencial de agressividade dos mananciais subterrâneos para abastecimento público em São Carlos (SP) – Brasil

Assessment of the aggressiveness potential of underground sources for public supply in São Carlos (SP) – Brazil

• **Data de entrada:**
27/09/2021

• **Data de aprovação:**
22/11/2021


Erich Kellner^{1*} | André Pina de Mesquita¹ | Fábio Noel Stanganini¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.002>

ORCID ID

Kellner E  <https://orcid.org/0000-0002-7592-5580>

Mesquita AP  <https://orcid.org/0000-0003-2687-5879>

Stanganini FN  <https://orcid.org/0000-0002-2497-2395>

Resumo

A qualidade físico-química das águas subterrâneas relaciona-se diretamente com as interações mineralógicas entre solo/rocha durante sua infiltração, tempo de permanência nos aquíferos e influências antrópicas decorrentes do uso e ocupação do solo. Assim, é comum encontrar águas com elevados índices de agressividade, os quais podem caracterizá-las como corrosivas ou incrustantes. Este estudo objetivou avaliar a agressividade da água proveniente de poços subterrâneos instalados no município de São Carlos-SP, a partir da determinação dos Índices de Saturação de Langelier e Ryznard. Foram analisadas amostras de água bruta de 26 poços que exploram os aquíferos Botucatu, Pirambóia, Serra Geral e Bauru. Todas as amostras analisadas apresentaram potencial extremamente corrosivo pelo Índice de Saturação de Ryznard, e corrosiva moderada pelo Índice de Saturação de Langelier.

Palavras-chave: Água subterrânea. Agressividade. Indicadores.

Abstract

The physicochemical quality of groundwater is directly related to the mineralogical interactions between soil/rock during its infiltration, time spent in the aquifers and human influences resulting from the use and occupation of the soil. Thus, it is common to find water with high levels of aggressiveness, which can characterize them as corrosive or encrusting. This study aimed to evaluate the aggressiveness of water from underground wells installed in the city of São Carlos-SP, based on the determination of the Langelier and Ryznard Saturation Indices. Samples of raw water from 26 wells that explore the Botucatu, Pirambóia, Serra Geral and Bauru aquifers were analyzed. All samples analyzed showed extremely corrosive potential according to Ryznard's Saturation Index, and moderately corrosive according to Langelier's Saturation Index.

Keywords: Groundwater. Aggressiveness. Indicators.

¹ Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – São Carlos – São Paulo – Brasil.

*Autor correspondente: erich.kellner@ufscar.br.

1 INTRODUÇÃO

O uso dos mananciais subterrâneos é uma alternativa adotada em regiões isoladas da malha urbana ou em setores urbanos que tiveram um aumento da demanda por água superior à capacidade instalada de abastecimento.

A qualidade físico-química das águas subterrâneas é função das interações com a mineralogia do solo/rocha durante sua infiltração e do seu tempo de permanência nos aquíferos, além das influências antrópicas decorrentes do uso e ocupação do solo. Com isso é bastante comum encontrar águas com elevados índices de agressividade, que podem manifestar-se tanto pela corrosão de tubulações de ligas metálicas como pela incrustação desses dispositivos.

De maneira geral, no Brasil, o desenvolvimento dos sistemas de abastecimento de água parece não ter sido sustentado pelo aproveitamento dos mananciais subterrâneos, tanto que a legislação brasileira normalizadora dos recursos hídricos – Lei 9433/97 (BRASIL, 1997) – não coloca as águas subterrâneas em um plano de destaque.

Nesse sentido, observa-se que as normas brasileiras relativas à qualidade das águas subterrâneas – Resoluções CONAMA 396 e 420 (BRASIL, 2008; BRASIL, 2009) – e para consumo humano – Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) – não fazem referência às características de agressividade dessas águas. Com isso, tem-se observado casos em que, após a adequação aos padrões de potabilidade, a água distribuída mantém-se agressiva podendo causar danos materiais aos usuários e até expô-los a condições nocivas à saúde, como é o caso da ingestão de água com excesso de cobre.

Assim, além dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), entende-se que a determinação da agressividade das águas, especialmente daquelas proveniente de mananciais

subterrâneos, pode auxiliar na determinação de agentes alcalinizantes ou acidificantes, auxiliando a implementação de tratamento adequado de maneira a reduzir ou evitar danos em instalações prediais e/ou na infraestrutura urbana, seja por incrustação ou corrosão (ALMEIDA, 2006).

A observação da agressividade da água para consumo humano vem sendo feita em vários países como Irã, EUA, Canadá e Índia entre outros, conforme relatado por Mirzabeygi et al. (2017), Stanton e Dennehy (2017), Kalyani et al (2017), Amouei et al. (2017), Canada (2017) e Health Canada (2020).

A medida da agressividade de águas pode ser observada, entre outros, pela determinação do Índice de Ryznar (IR) e pelo Índice de Langelier (IL), ou índice de saturação, desenvolvido por Langelier (1936) e adotado pela APHA (2005) como indicador da tendência da água em precipitar ou dissolver CaCO_3 (Método 2330.B).

Tanto o IL como o IR sugerem uma escala do potencial de agressividade de uma solução aquosa, a partir de sua composição utilizando parâmetros mensuráveis, como alcalinidade, dureza, concentração de sólidos dissolvidos totais, temperatura e pH. Enquanto o IL é um índice qualitativo, que indica se a solução é subsaturada ou supersaturada com CaCO_3 , ou seja, representa um modelo de equilíbrio derivado do conceito teórico de saturação da água relacionado ao carbonato de cálcio, o IR é uma extensão prática do IL, baseada na experiência, que tenta quantificar a relação entre a saturação de CaCO_3 e a formação de crosta alcalina (GRADES, 2004).

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo foi o de determinar o grau de agressividade das águas provenientes de poços subterrâneos no município de São Carlos (SP), a partir da aplicação dos Índices de Langelier (IL) e de Ryznar (IR).

3 METODOLOGIA

O município de São Carlos está localizado na região central do Estado de São Paulo, entre

as coordenadas UTM 7.546 – 7.610 Km e 182 – 218 Km, conforme apresentado na Fig. 1.

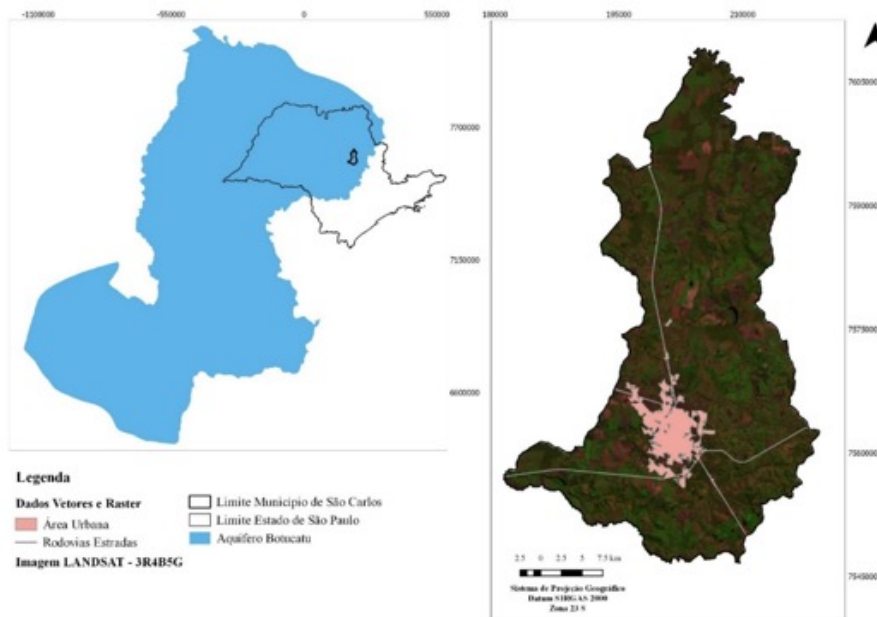


Figura 1 - Localização do município de São Carlos em relação ao Estado de SP e aos limites do Aquífero Botucatu
Fonte: os autores.

A classificação do clima, pelo método Köppen, apresenta-se como o temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) caracterizando duas estações bem definidas, sendo uma seca de abril a setembro e outra chuvosa de outubro a março, com precipitação média anual de 1.422,8mm, temperatura média anual de 21,2°C, com mínima média de 15,3°C e máxima de 27°C (CEPAGRI, 2017).

Até o ano de 2017, quando a pesquisa estava sendo conduzida, a captação de água para o abastecimento público era proveniente, aproximadamente, 54% de manancial subterrâneo, constituídos por 28 poços profundos, e 46% por mananciais superficiais, constituído por 2 captações superficiais. A Fig. 2 ilustra a localização dos poços profundos considerados no estudo.

A forma de relevo predominantemente observada relaciona-se às mesas e morros isolados,

resultantes de intenso processo erosivo provocado pelos rios que, partindo de zonas elevadas, entalharam profundamente o planalto, denotando uma característica básica da zona de transição entre as “Cuestas Basálticas” e o Planalto Ocidental (WALM, 2000).

O cerrado é a vegetação predominante do município, normalmente associada aos terrenos arenosos, apresentando diversificadas fitofisionomias, desde campo cerrado até cerrado (SOARES, 2003). Destaca-se, porém, que a maior parte da área do município já se encontra recoberta por campos de cultivo e mesmo por vegetação de reflorestamento. Aos solos relacionados à Formação Serra Geral, nas encostas, associa-se outro tipo de vegetação, caracterizado por árvores de médio porte e arbustos (SILVA, 2017).

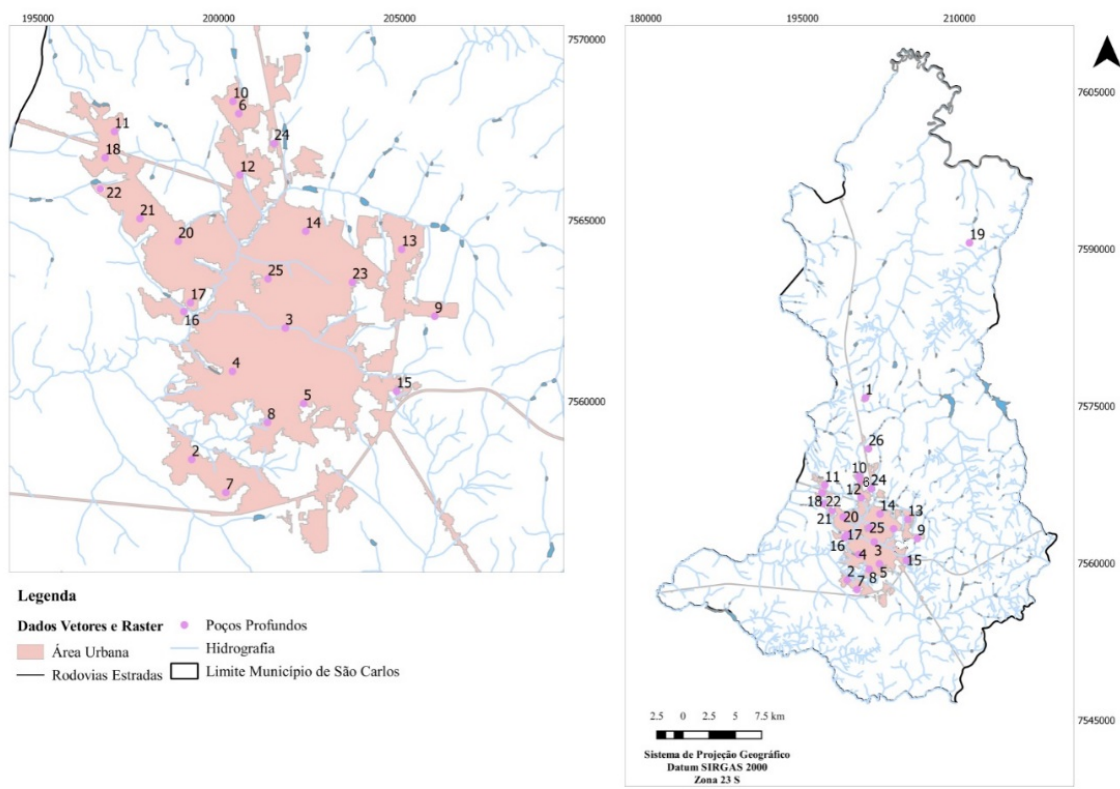


Figura 2 - Localização dos poços profundos considerados

Fonte: os autores.

O estudo foi realizado em 26 poços profundos que atendem exclusivamente o abastecimento público, sendo 25 deles operados pelo SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto do Município de São Carlos, um operado pelo empreendedor, estando todos outorgados pelo DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.

A água proveniente dos mananciais subterrâneos em geral é submetida a tratamento pelo SAAE a fim de adequá-la aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), sendo empregado Na_2CO_3 (barrilha leve) para elevação do pH, NaClO (hipoclorito de sódio) para desinfecção e H_2SiF_6 (ácido fluossilícico) para fluoração, sendo posteriormente encaminhadas aos reservatórios de distribuição.

Foram coletadas amostras *in natura* (água bruta) dos 26 poços em operação em todo o município de São Carlos (SP), cujas profundidades variavam entre 80 e 484 metros, atingindo os aquíferos Botucatu e Pirambóia, formadores do Aquífero Guarani, e dos aquíferos Serra Geral e Bauru.

Apesar da aplicação do IL e do IR em águas subterrâneas ser pouco pesquisada no país, devido ao fato de esses índices não indicarem e/ou interferirem na potabilidade da água destinada ao consumo humano, estes deveriam servir como norteadores para a execução de poços no tocante aos materiais e equipamentos a serem utilizados, bem como a frequência e período de manutenções, para que os poços tenham assegurada sua vida útil conforme o projeto e não estejam sujeitos a problemas mais danosos (CAVAZZANA, 2011).

Em locais com águas incrustantes, é possível ter redução de vazão dada a incrustação de carbonato de cálcio (CaCO_3), e em locais com águas agressivas é possível haver rompimento das tubulações de recalque e conseqüentemente queda do conjunto de bombeamento, ocasionando a perda do poço devido à inviabilidade da retirada do equipamento. Além disso, é possível identificar os tratamentos físico-químicos necessários para inibição de suas ações corrosivas ou incrustantes nos sistemas de distribuição (GRADES, 2004).

3.1 Índice de Saturação de Langelier (IL)

O índice de saturação de Langelier (IL) é um modelo do equilíbrio derivado de conceitos teóricos de saturação que indica o grau de saturação do carbonato de cálcio na água, representado pela diferença entre o pH medido na água e o pH de saturação da água contendo íons como Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- quando o sistema $\text{CO}_3^{-2} \times \text{CO}_2$ encontra-se em equilíbrio, conforme Eq. 1.

$$\text{IL} = \text{pH} - \text{pH}_{\text{saturação}} \quad (1)$$

O $\text{pH}_{\text{saturação}}$ pode ser obtido por coeficientes que dependem da temperatura da amostra, da alcalinidade, da dureza e da concentração de sólidos dissolvidos totais, conforme método proposto por Langelier (1936) e representado pela Eq. 2.

$$\text{pH}_{\text{saturação}} = 9,3 + A + B - C - D \quad (2)$$

onde A, B, C, D são, respectivamente, parâmetros que dependem da concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT), da temperatura (T), da concentração de cálcio e da alcalinidade total da água amostrada, sendo expressos pelas Eq. 3, 4, 5 e 6.

$$A = \frac{\log(\text{SDT} - 1)}{10} \quad (3)$$

$$B = 12,12 \cdot \log(T+273) + 34,55 \quad (4)$$

$$C = \log(\text{Ca}^{+2}) \quad (5)$$

$$D = \log(\text{ALK}) \quad (6)$$

sendo SDT a concentração de sólidos dissolvidos totais (mg/L); T a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$); Ca^{+2} a concentração de cálcio como CaCO_3 (mg/L); ALK a alcalinidade como CaCO_3 (mg/L).

Consoante o valor para o índice de Langelier obtido, a água pode encontrar-se em um dos três estados: em equilíbrio químico, quando $\text{IL}=0$; com tendência a ser corrosiva, quando $\text{IL}<0$; com tendência a ser encrustante, quando $\text{IL}>0$, mais especificamente pelos valores constantes na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do estado de equilíbrio químico em função do Índice de Langelier.

Valor IL	Indicação
>4	Incrustação severa
3 a 4	Incrustação moderada
1 a 3	Incrustação suave
0,5 a 1	Incrustação muito suave
0,5 a -0,5	Balanceado
-0,5 a -2	Corrosão suave
-2 a -5	Corrosão moderada
< -5	Corrosão severa

Fonte: adaptado de Grades (2004).

3.2 Índice de Saturação de Ryznard (IR)

O índice de Ryznar (IR) é expresso pela Eq. 7.

$$\text{IR} = 2 \cdot \text{pH}_{\text{saturação}} - \text{pH} \quad (7)$$

sendo pH o potencial hidrogeniônico da água amostrada (adim.), $\text{pH}_{\text{saturação}}$ o pH de saturação conforme expresso pela Eq. 2.

Consoante o valor para o índice de Ryznar obtido, a água pode encontrar-se em um dos estados descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do estado de equilíbrio químico em função do Índice de Ryznard (IR).

Valor IR	Indicação
> 4	Fortemente incrustante
4 a 5	Ligeiramente incrustante
5 a 6	Incrustação leve
6 a 7	Balanceado
7 a 7,5	Significativamente corrosiva
7,5 a 8,5	Fortemente corrosiva
> 8,5	Extremamente corrosiva

Fonte: Adaptado de Grades (2004).

3.3 Determinação das características físico-químicas das amostras de água bruta

Para realização das análises físico-químicas, foram coletados 500 mL de água bruta de cada poço considerado. O procedimento amostral foi

realizado durante 15 meses, no período de novembro/2016 a janeiro/2018. Para os poços n° 1, 10, 12, 18, 24 e 26 as amostras foram coletadas quinzenalmente. Para os poços 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23 e 25 as amostras foram coletadas mensalmente.

Na coleta foram determinados os valores da temperatura e do pH, sendo utilizados termômetro, com escala de fundo de 0,1°C, e pHmetro digital.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, onde foram determinadas as concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT), dureza, alcalinidade e pH.

O Quadro 1 apresenta as variáveis empregadas para o cálculo do pH de saturação, bem como os métodos empregados para sua determinação.

Quadro 1 - Metodologias analíticas para medição de variáveis empregadas na determinação do Índice de Langelier.

Variáveis	Unidade	Método	Referência
Temperatura	°C	Potenciométrico	---
pH	----	Potenciométrico	---
Alcalinidade	mg.L ⁻¹	Titulação potenciométrica	APHA (1995)
Dureza	mg.L ⁻¹	Titulação potenciométrica	APHA (1995)
Sólidos Dissolvidos Totais	mg.L ⁻¹	Gravimetria	APHA (1995)

Fonte: os autores.

3.4 Confecção do Mapa do Índice de Agressividade da Água por meio de Geoprocessamento

O geoprocessamento é a etapa de tratamento e análise de informações geradas por meio de sensoriamento remoto (aerofotogrametria ou utilização de imagens de satélite) e/ou utilização de coordenadas obtidas por meio de um aparelho *Global Position System* (GPS). Para isso, é viabilizada a produção de mapas, cartogramas, gráficos e sistematizações em geral que, aliados à utilização de *softwares* especialmente programados para essa função (Sistema de Informações Geo-

gráficas - SIG), podem fazer análises mais precisas do material.

As coordenadas dos poços profundos analisados, assim como a cota do terreno e os aquíferos, foram obtidos a partir das outorgas concedidas e disponibilizadas pelo DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE, 2020) e/ou fornecidas pelo SAAE – São Carlos (2017), estando os resultados na Tabela 3.

Os resultados dos indicadores de agressividade de cada poço amostrado foram lançados nas coordenadas UTM com característica de cada poço,

utilizando-se o software livre QGIS, representando-se a magnitude da agressividade proporcionalmente ao diâmetro da mancha.

Os mapas gerados estão representados nas Fig. 3 e 4.

3.5 Interpretação dos dados e análise dos resultados

Após a determinação dos parâmetros físico-químicos estabelecidos no Quadro 1, foram calculados os Índices de Langelier (IL) e Ryznar (IR), segundo as Eq. 1 a 6 e 7, respectivamente. A partir da determinação dos índices, foram verificadas as indicações de agressividade segundo as Tabelas 1 e 2, respectivamente, para Langelier e Ryznar.

Os dados dos parâmetros físico-químicos e dos índices de Langelier e de Ryznar foram separados em grupos de aquíferos e analisados estatisticamente quanto à normalidade, homogeneidade e análise de variância. Para isso foi empregado o software *Action Stat*® acoplado à planilha eletrônica Excel®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 contém os dados locais dos poços considerados neste estudo, a saber: identificação do poço, cota do terreno, coordenadas geográficas da localização do poço e aquífero explorado.

Tabela 3 - Dados de localização dos poços analisados e seus respectivos aquíferos.

N°	Poços	Cota do Terreno (m)	Profundidade (m)	Coordenadas UTM		Aquífero
				N	E	
1	Água Vermelha	824	251	757575,000	20081,000	Guarani
2	Antenor Garcia	775	---	755815,000	19920,000	Botucatu
3	Azulville	830	272	756135,000	20390,000	Botucatu
4	Boa Vista	855	340	756028,000	20086,000	Botucatu
5	CDHU-Vila Isabel	850	277	755999,000	20240,000	Botucatu
6	Dahma 2	874	---	756819,000	20080,000	Guarani
7	Cidade Aracy	800	380	755753,000	20023,000	Botucatu
8	Cruzeiro do Sul	850	286	755917,000	20180,000	Botucatu
9	Douradinho	923	277	756233,000	20591,000	Botucatu
10	Pq Eco Tecnológico	872	350	756864,000	20161,000	Botucatu/Pirambóia
11	Embaré	875	284	756747,000	19712,000	Botucatu
12	Jockey Club	870	349	756685,000	20055,000	Botucatu
13	Maria S. Fagá	870	380	756470,000	20500,000	Botucatu
14	Nova Estância	878	477	756472,000	20242,000	Botucatu
15	Novo Horizonte	884	300	756035,000	20558,000	Botucatu
16	Parque Faber I	810	208	756219,000	19859,000	Botucatu
17	Faber II	818	411	756213,000	19854,000	Botucatu/Pirambóia
18	Parque Fehr	870	270	756670,000	19715,000	Botucatu
19	Santa Eudoxia	640	200	756064,000	21098,000	Botucatu
20	Santa Felícia	880	465	756446,000	19888,000	Botucatu
21	São Carlos III	878	431	756538,000	19803,000	Botucatu
22	Terra Nova	849	350	756651,000	19621,000	Botucatu/Pirambóia
23	Vila Nery	910	484	756332,000	20378,000	Botucatu
24	Village III	868	---	756681,000	20074,000	Botucatu
25	Vital Brasil (Cica)	805	158	756206,000	20190,000	Botucatu/Pirambóia
26	Tutoya do Vale	781	80	757278,000	20064,000	Botucatu

Fonte: SAAE São Carlos (2017) / DAEE (2020)

A Tabela 4 apresenta, para cada poço, o número de amostras de água bruta coletadas e os valores

médios obtidos para os parâmetros físico-químicos analisados.

Tabela 4 - Valores médios obtidos para os parâmetros físico-químicos analisados.

Nº	Poço	Número de Amostras	pH ^(a)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Dureza (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	SDT (mg.L ⁻¹)	Temperatura (°C)
1	Água Vermelha	30	6,32	13,82	16,70	36,66	21,6
2	Antenor Garcia	15	5,63	33,41	47,20	83,58	17,8
3	Azulville	15	5,47	6,21	13,29	24,95	17,9
4	Boa Vista	15	5,76	12,43	14,14	26,53	17,9
5	CDHU-Vila Isabel	15	5,22	4,83	4,81	13,21	17,8
6	Dahma 2	15	5,93	7,71	7,29	15,67	18,3
7	Cidade Aracy	15	5,57	13,55	23,88	37,07	17,9
8	Cruzeiro do Sul	15	6,01	30,87	34,89	57,99	17,9
9	Douradinho	15	6,13	13,81	16,21	30,87	21,0
10	Pq Eco Tecnológ.	30	5,74	5,08	3,35	12,65	20,6
11	Embaré	15	5,90	7,65	8,96	18,27	21,4
12	Jockey Clube	30	5,84	6,11	6,71	17,76	20,6
13	Fagá	15	6,18	13,81	13,84	28,16	21,1
14	Nova Estância	15	5,80	12,43	11,58	24,40	21,1
15	Novo Horizonte	15	5,69	5,55	8,25	17,25	17,9
16	Parque Faber I	15	6,16	11,06	12,67	24,84	21,3
17	Faber II	15	6,17	16,59	17,43	34,50	21,3
18	Parque Fehr	30	5,70	5,11	4,16	13,94	20,8
19	Santa Eudóxia	15	5,74	11,82	13,30	24,92	20,3
20	Santa Felícia	15	6,13	15,20	18,47	33,19	21,4
21	São Carlos III	15	5,99	12,43	14,58	25,95	21,2
22	Terra Nova	15	5,91	8,27	8,47	18,76	21,5
23	Vila Nery	15	5,96	14,53	15,54	31,16	20,9
24	Village III	30	5,80	7,11	5,00	16,40	20,5
25	Vital Brasil (Cica)	15	5,88	14,20	28,50	50,72	17,8
26	Tutoya do Vale	30	5,36	4,22	7,95	21,89	20,6

Nota: ^(a) os valores médios de pH foram calculados a partir das médias das concentrações de H⁺

Fonte: os autores.

A partir dos resultados obtidos das análises físico-químicas das amostras coletadas foram determinados os desvios padrão, bem como o

coeficiente de variação de cada parâmetro considerado, estando os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Desvios padrão e coeficientes de variação observados para os parâmetros físico-químicos analisados.

Nº	Poço	pH ^(a)	Desvio padrão (Coeficiente de variação do parâmetro)			Temperatura (°C)
			Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Dureza (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	SDT (mg.L ⁻¹)	
1	Água Vermelha	0,17 (0,03)	6,08 (0,44)	6,44 (0,39)	6,84 (0,19)	1,7 (0,08)
2	Antenor Garcia	1,63 (0,29)	2,75 (0,08)	13,51 (0,29)	31,08 (0,37)	1,8 (0,10)
3	Azulville	0,25 (0,05)	2,10 (0,34)	0,50 (0,04)	0,61 (0,02)	1,7 (0,10)
4	Boa Vista	0,24 (0,04)	4,20 (0,34)	0,24 (0,02)	0,22 (0,01)	1,7 (0,10)
5	CDHU-Vila Isabel	0,33 (0,06)	1,43 (0,30)	0,33 (0,07)	0,35 (0,03)	1,8 (0,10)
6	Dahma 2	0,23 (0,04)	6,42 (0,83)	5,69 (0,78)	6,45 (0,41)	1,4 (0,08)
7	Cidade Aracy	0,67 (0,12)	4,25 (0,31)	10,60 (0,44)	16,62 (0,45)	1,7 (0,10)
8	Cruzeiro do Sul	0,93 (0,15)	23,76 (0,77)	27,73 (0,79)	43,94 (0,76)	1,7 (0,10)
9	Douradinho	0,37 (0,06)	4,87 (0,35)	0,36 (0,02)	0,09 (0,00)	1,0 (0,05)
10	Pq Eco Tecnológico	0,37 (0,07)	0,79 (0,16)	1,54 (0,46)	5,17 (0,41)	2,1 (0,10)
11	Embaré	0,23 (0,04)	4,60 (0,60)	0,07 (0,01)	0,98 (0,05)	1,3 (0,06)
12	Jockey Clube	0,36 (0,06)	1,48 (0,24)	1,57 (0,23)	3,08 (0,17)	2,1 (0,10)
13	Fagá	0,41 (0,07)	4,87 (0,35)	1,46 (0,11)	0,16 (0,01)	1,0 (0,05)

continua...

Tabela 5 - Continuação

Nº	Poço	pH ^(a)	Desvio padrão (Coeficiente de variação do parâmetro)			Temperatura (°C)
			Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Dureza (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	SDT (mg.L ⁻¹)	
14	Nova Estância	0,42 (0,07)	4,20 (0,34)	1,01 (0,09)	0,07 (0,00)	1,1 (0,05)
15	Novo Horizonte	0,18 (0,03)	2,68 (0,48)	0,43 (0,05)	0,09 (0,01)	1,7 (0,10)
16	Parque Faber I	0,12 (0,02)	1,84 (0,17)	1,15 (0,09)	2,62 (0,11)	1,2 (0,06)
17	Faber II	0,02 (0,00)	6,21 (0,37)	0,75 (0,04)	0,11 (0,00)	1,3 (0,06)
18	Parque Fehr	0,18 (0,03)	1,80 (0,35)	0,51 (0,12)	3,03 (0,22)	2,2 (0,10)
19	Santa Eudóxia	0,30 (0,06)	5,54 (0,31)	0,81 (0,20)	0,16 (0,01)	1,3 (0,08)
20	Santa Felícia	0,36 (0,05)	3,64 (0,36)	2,59 (0,04)	0,24 (0,00)	1,6 (0,06)
21	São Carlos III	0,35 (0,06)	4,20 (0,34)	2,74 (0,19)	0,22 (0,01)	1,2 (0,05)
22	Terra Nova	0,21 (0,04)	2,19 (0,27)	0,82 (0,10)	1,06 (0,06)	1,4 (0,06)
23	Vila Nery	0,31 (0,05)	6,12 (0,42)	0,94 (0,06)	0,07 (0,00)	0,9 (0,04)
24	Village III	0,26 (0,05)	1,23 (0,17)	0,55 (0,11)	2,96 (0,18)	2,1 (0,10)
25	Vital Brasil (Cica)	0,17 (0,05)	6,08 (0,45)	6,44 (0,11)	6,84 (0,02)	1,7 (0,09)
26	Tutoya do Vale	0,26 (0,05)	0,98 (0,23)	1,72 (0,22)	5,28 (0,24)	2,0 (0,10)

Nota: (a) os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação do pH foram calculados a partir das concentrações médias de H⁺

Ao aplicar o método proposto por Garcia (1989) para classificar o coeficiente de variação (CV) em relação às médias e desvio padrões obtidos para os parâmetros físico-químicos analisados e apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5, observou-se que, de maneira geral, os parâmetros analisados tiveram variação classificada como Média, conforme apresentado na Tabela 6.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, em especial os coeficientes de variação,

percebe-se que a composição da água dos poços sofreu alterações em todos os parâmetros avaliados. Essa variação pode indicar flutuações sazonais que, por sua vez, podem estar relacionadas com as diferenças de entrada de água na coluna do poço, decorrente da contribuição de diferentes aquíferos. Marion, Capoane e Silva (2007) também relataram variações sazonais nos parâmetros de qualidade da água subterrânea.

Tabela 6 - Classificação dos Coeficiente de Variação (CV) para os parâmetros físico-químicos analisados.

Classificação	pH	Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Dureza (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	SDT (mg.L ⁻¹)	Temperatura (°C)
Baixo	0,0%	15,4%	0,0%	0,0%	34,6%
Médio	85,7%	73,1%	84,6%	80,8%	65,4%
Alto	7,7%	3,8%	7,7%	15,4%	0,0%
Muito Alto	3,8%	7,7%	7,7%	3,8%	0,0%

A partir dos valores médios obtidos para os parâmetros analisados, foram calculados os índices de Langelier e de Ryznard a partir das Eq. 1 a 7.

Os valores dos Índices de Langelier e de Ryznard calculados para as amostras analisadas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos Índices de Langelier (IL) e de Ryznard (IR) para os poços considerados.

N°	Poço	Aquífero	Langelier		Ryznard	
			Valor Médio	Indicação	Valor Médio	Indicação
1	Água Vermelha	Guarani	-2,97	Corr. Mod.	12,30	Extr. Corrosiva
2	Antenor Garcia	Botucatu	-1,50	Corr. Suave	10,04	Extr. Corrosiva
3	Azulville	Botucatu	-4,24	Corr. Mod.	14,00	Extr. Corrosiva
4	Boa Vista	Botucatu	-3,63	Corr. Mod.	13,07	Extr. Corrosiva
5	CDHU Vila Isabel	Botucatu	-4,97	Corr. Mod.	15,25	Extr. Corrosiva
6	Dahma 2	Guarani	-4,33	Corr. Mod.	14,77	Extr. Corrosiva
7	Cidade Aracy	Botucatu	-3,30	Corr. Mod.	12,52	Extr. Corrosiva
8	Cruzeiro do Sul	Botucatu	-3,34	Corr. Mod.	12,93	Extr. Corrosiva
9	Douradinho	Botucatu	-3,03	Corr. Mod.	12,31	Extr. Corrosiva
10	Pq. Eco Tecnológico	Botucatu/Pirambóia	-4,49	Corr. Mod.	14,87	Extr. Corrosiva
11	Embaré	Botucatu	-3,84	Corr. Mod.	13,75	Extr. Corrosiva
12	Jockey Club	Botucatu	-4,06	Corr. Mod.	14,06	Extr. Corrosiva
13	Maria S. Faga	Botucatu	-3,02	Corr. Mod.	12,36	Extr. Corrosiva
14	Nova Estância	Botucatu	-3,52	Corr. Mod.	12,97	Extr. Corrosiva
15	Novo Horizonte	Botucatu	-4,30	Corr. Mod.	14,32	Extr. Corrosiva
16	Parque Faber I	Botucatu	-3,40	Corr. Mod.	12,90	Extr. Corrosiva
17	Faber II	Botucatu/Pirambóia	-3,00	Corr. Mod.	12,17	Extr. Corrosiva
18	Parque Fehr	Botucatu	-4,54	Corr. Mod.	14,81	Extr. Corrosiva
19	Santa Eudoxia	Botucatu	-3,57	Corr. Mod.	13,01	Extr. Corrosiva
20	Santa Felícia	Botucatu	-2,97	Corr. Mod.	12,15	Extr. Corrosiva
21	São Carlos III	Botucatu	-3,27	Corr. Mod.	12,63	Extr. Corrosiva
22	Terra Nova	Botucatu/Pirambóia	-3,75	Corr. Mod.	13,57	Extr. Corrosiva
23	Vila Nery	Botucatu	-3,25	Corr. Mod.	12,53	Extr. Corrosiva
24	Village III	Botucatu	-4,18	Corr. Mod.	14,23	Extr. Corrosiva
25	Vital Brasil (Cica)	Botucatu / Pirambóia	-3,17	Corr. Mod.	12,29	Extr. Corrosiva
26	Tutoya do Vale	Boucatu	-4,67	Corr. Mod.	14,76	Extr. Corrosiva

Nota: Corr. Mod.=Corrosão Moderada
Extr. Corrosiva = Extremamente Corrosiva

A partir dos resultados obtidos para os índices de Langelier e de Ryznar, foram construídos os mapas de áreas apresentados nas Fig. 3 e 4, nas quais a magnitude dos índices de agressividades foram proporcionais ao diâmetro das circunferências representadas.

Ao analisar os valores dos índices de Langelier e Ryznar apresentados na Tabela 7 e observando os mapas apresentados nas Fig. 3 e 4, percebe-se que as águas provenientes dos mananciais subterrâneos analisados apresentaram-se agressivamente corrosivas.

Para o índice de saturação de Langelier (IL), os valores variaram de -1,50 (Poço 2) a -4,97 (Poço 5), sendo a agressividade de todas as amostras dos poços analisados classificadas como “Corrosão Moderada”, segundo Grades (2004).

Para o índice de Ryznard (IR), os valores variaram de 10,04 (Poço 2) a 15,25 (Poço 5), sendo as amostras de água classificadas como “Extremamente Corrosiva” conforme proposto por Grades (2004).

Ao agruparem-se os indicadores de agressividade apresentados na Tabela 7, por aquífero, percebe-se que, para o aquífero Guarani, $-4,33 \geq IL \geq -2,97$ e $12,30 \leq IR \leq 14,77$; para a formação Botucatu-Pirambóia, $-4,49 \geq IL \geq -3,00$ e $12,17 \leq IR \leq 14,87$; para a formação Botucatu, $-4,97 \geq IL \geq -1,50$ e $10,04 \leq IR \leq 15,25$.

Na análise estatística dos dados empregou-se o software Action Stat Pro® acoplado à planilha eletrônica Excel®.

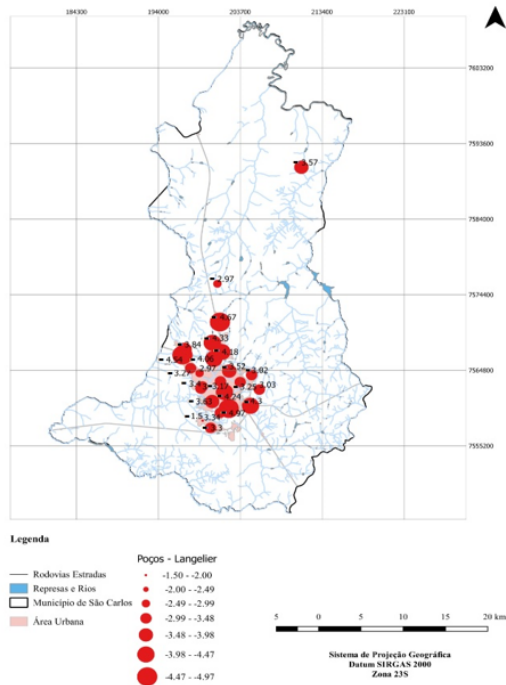


Figura 3 – Índice de Saturação de Langelier (LSI) médio, obtido para os poços analisados.

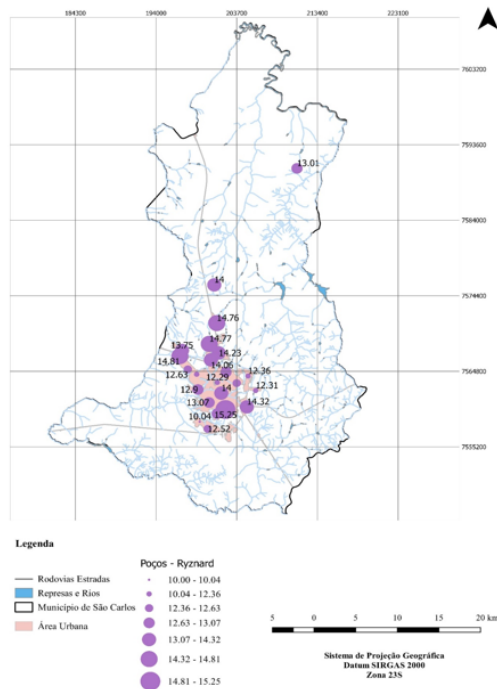


Figura 4 – Índice de Ryznar médio, obtido para os poços analisados.

Ao analisar estatisticamente os resultados de IL entre os grupos de aquíferos, observou-se que a amostra era normalizada (p -valor = 0,231 > α = 0,050) para o teste *Anderson-Darlin* modificado (A_m^2 = 0,466). Em relação à homogeneidade dos dados, obteve-se χ^2 (50;0,05) = 43,7 < $\chi^2 = 44,85$ com p -valor = 0,6027 > 5%. A ANOVA resultou em p -valor = 0,996 > 5%, aceitando-se a hipótese de igualdade entre os valores médios de IL observados nos aquíferos.

Para a análise dos valores de IR, observou-se que a amostra era normalizada (p -valor = 0,201 > α = 0,050), para o teste *Anderson-Darlin* modificado (A_m^2 = 0,490). Ao analisar a homogeneidade dos dados obteve-se χ^2_{crit} (50;0,05) = 43,7 < $\chi^2 = 52,00$ de maneira que p -valor = 0,396 > 5%. A ANOVA resultou em p -valor = 0,9452 > 5%, aceitando-se a hipótese de igualdade entre os valores médios de IR observado nos aquíferos.

Em relação aos índices de agressividade encontrados, observou-se que 100% das amostras resultaram em característica extremamente corrosiva segundo o Índice de Saturação de Ryznar, e 96,25% corrosão moderada, de acordo com o Índice de Saturação de Langelier, conforme apresentado na Tabela 7.

Os resultados obtidos da aplicação do IL e do IR acompanharam a variação do pH. Ao norte da área urbana (Dahma 2, Parque Eco Tecnológico e Tutoya do Valle) e na região sul (Antenor Garcia, Cidade Aracy e Cruzeiro do Sul) obtiveram-se valores críticos de corrosão para os índices IL e IR, variando, respectivamente de -4,33 a -4,67 e 14,77 a 14,87 para a região norte, e de -3,34 a -1,50 e 10,04 a 12,93 para a região sul.

O pH das amostras representou um dos principais fatores que influenciaram a determinação do IL e do IR. Segundo Appelo e Postma (2009), os poços com pH baixos estão localizados em regiões próximas a córregos e nascentes, o que pode vir a caracterizar uma zona de recarga, proveniente

de fraturas na formação Serra Geral, com presença de águas jovens e altas concentrações de CO_2 , dissolvido da atmosfera e dos solos com matéria orgânica. Assim, esse gás hidrolisa na água formando ácido carbônico, liberando o íon (H^+) para o meio acidificando-o.

De acordo com Cavazanna (2011), a água com caráter ácido, ao percolar pelos interstícios das rochas basálticas, promove a dissolução de minerais que podem estar precipitados nas amígdalas das rochas, provocando o aumento de cátions, da alcalinidade e do pH proporcionalmente ao tempo de contato água/rocha.

Os valores obtidos para a Alcalinidade variaram de 4,22 mg/L a 33,41 mg/L, esta última observada nas amostras do poço 2-Antenor Garcia. As amostras desse mesmo poço apresentaram os maiores valores para SDT (31,08 mg.L⁻¹) e resultaram nos menores valores observados para IL e IR.

Uma possível explicação para tal fato decorre da possibilidade da maior interação entre água e rocha, pelo potencial de dissolução dos minerais, por se tratar de águas subterrâneas que estiveram confinadas por maior tempo no aquífero (poço de cota mais baixa) bem como pelo fluxo das águas hidrotermais pelas vesículas e amígdalas, dissolvendo os minerais sedimentados e incrustados, conforme citado por Appelo e Postma (2009).

Pela relação entre dissolução e precipitação, de acordo com estudo de Appelo e Postma (2009), Gonçalves e Giampá (2006) e Cavazzana (2011), os corpos hídricos com maior concentração de Ca^{2+} , HCO_3^- e OH^- tendem a ter seu pH superior a 7,0. Entretanto, os poços Antenor Garcia e Cruzeiro do Sul possuem alta concentração dos parâmetros STD, Ca^{2+} e Alcalinidade, conferindo potenciais hidrogeniônicos médios de 5,63 e 6,01, respectivamente.

Ao calcular a matriz de correlação (Pearson) entre as cotas dos fundos dos poços, as quais foram obtidas da diferença da cota do terreno e a profundidade dos poços, com os parâmetros físico-químicos analisados e considerando o nível de significância de 0,05, obteve-se, estatisticamente, fraca correlação: Dureza ($r=-0,111$; $p\text{-valor}=0,613$); Alcalinidade ($r=-0,280$; $p\text{-valor}=0,196$); sólidos dissolvidos totais ($r=-0,051$; $p\text{-valor}=0,816$); concentração hidrogeniônica ($r=0,281$; $p\text{-valor}=0,195$) e Temperatura ($r=-0,204$; $p\text{-valor}=0,352$), indicando que não houve evidências suficientes para apoiar a afirmação da existência de correlação entre a cota do fundo do poço e os valores obtidos para as variáveis físico-químicas analisadas.

5 CONCLUSÕES

Com esse estudo, identificou-se que o comportamento das águas subterrâneas no município de São Carlos é corrosivo, uma vez que 100% das amostras resultaram em característica extremamente corrosiva, segundo o Índice de Saturação de Ryznard, e 96,25% corrosão moderada, de acordo com o Índice de Saturação de Langelier.

Este estudo possibilitou também a identificação dos poços que possuem maior potencial para a corrosão/incrustação dos sistemas de captação e distribuição das águas subterrâneas do município e sua variação espacial, auxiliando o poder público na tomada de decisão, seja para a escavação de novos poços, seja para a decisão do processo de manutenção necessário e de seu respectivo período.

Acrescenta-se também a relevância deste estudo para o município de São Carlos por se tratar de um estudo pioneiro realizado no Estado de São Paulo, que pode ser utilizado como uma ferramenta de avaliação dos Sistemas Aquíferos da cidade, bem como para o Gerenciamento das Águas Subterrâneas no Município.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Autônomo de Águas e Esgoto (SAAE) de São Carlos e ao Escritório de Apoio Técnico de São Carlos do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE/EAT São Carlos pela cooperação técnica para a realização da pesquisa.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Kellner, E.; **Metodologia:** Kellner, E., Mesquita, A. P.e Stanganini, F. N.; **Investigação:** Kellner, E., Mesquita, A. P.e Stanganini, F. N.; **Redação – Primeira versão:** Kellner, E., Mesquita, A. P.e Stanganini, F. N.; **Redação – Revisão & Edição:** Kellner, E.; **Aquisição de Financiamento:** Kellner, E.; **Recursos:** Kellner, E.; **Supervisão:** Kellner, E.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. N. **Modelagem Integrada de Recursos Hídricos com apoio de um Sistema de Informações Geográficas**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard Method for the examination of water and wastewater**. 21ed. Washington: Byrd Prepress Springfield, 2005.

AMOUEI, A.; ASGHARNIA, H.; FALLAH, H.; YARI, A. R.; MAHMOUDI, M. Corrosion and Scaling Potential in Drinking Water Distribution of Babol, Northern Iran Based on the Scaling and Corrosion Indices. **Arch Hyg Sci**. 2017; 6 (1) :1-9.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. 2.ed. 4th corrected reprint. Amsterdam: A.A. Balkema Publisher, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 9433/97 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 08 jan. 1997.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 396/08 de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 abr. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 420/09 de 30 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade de solo e águas subterrâneas quanto à presença substâncias químicas. Brasília, 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2019.

BRASIL. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 07 mai. 2021.

CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality**. Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water. 2017. 22p. Disponível em: https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/sum_guide-res_recom-eng.pdf . Acesso em: 03 mar. 2018.

CAVAZZANA, G. H. **Análise da corrosividade e incrustação das águas subterrâneas na região urbana de Campo Grande – MS**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011.

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. **Clima dos Municípios Paulistas**: São Carlos. Campinas-SP, 2015. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html> Acesso em: 25 out. 2017.

DAEE. Departamento de Água e Energia Elétrica. **Usos dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (OnLine)**, São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.aplicacoes.daee.sp.gov.br/usuarios/daeeusosDpo.asp>>. Acesso em 02 ago. 2020.

GARCIA, C.H. Tabelas para a classificação do coeficiente de variação. Piracicaba: Ipef, 1989. 12 p. (Circular Técnica, 171). Disponível em: < <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr171.pdf>>

GONÇALVES, V.G.; GIAMPÁ, C.E.Q. (Ed.) **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Signus Editora, 2006.

GRADES, E. des A. **Modelling and Simulation of CO₂ Release in Multiple-Effect Distillers For Seawater Desalination**. Jordanien, 2004. P 78-84. Dissertation (Doktor-Ingenieur). Mathematisch-Naturwissenschaftlich - Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Tafilah, 2004. Disponível em: < <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.633.303&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 07 set. 2019.

HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality**. 2020. 25p. Disponível em: <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/summary-table-EN-2020-02-11.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.

KALYANI, D. Sarada; RAJESH, V.; REDDI, E. U. B.; KUMAR, K. CHAYTANIA; RAO, S. Srinivasa. Correlation between corrosion indices and corrosiveness of groundwater: a study with reference to selected areas of Krishna District, Andhra Pradesh, India. **Environmental Earth Sciences**. Vl. 76.2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6908-y>

LANGELIER, W. F., The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment. **Journal of American Water Works Association** 1936, 28, 1500-1521.

MARION, F. A.; CAPOANE, V.; SILVA, J. L. S. Avaliação da qualidade da água subterrânea em poço no campus da UFSM, Santa Maria – RS. **Ciência e Natura**, 29 (1): 97-109, 2007. <https://doi.org/10.5902/2179460X9761>

MIRZABEYGI, Majid; YOUSEFI, Nader; ABBASNIA, Abbas; YOUZI, Hadi; ALIKHANI, Mahdi; MAHVI, Amir Hossein. Evaluation of groundwater quality and assessment of scaling potential and corrosiveness of water supply networks, Iran. **Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA** [in press]2017. 10p. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.128>

SILVA, G. C; MENEZES, D. B. Caracterização de unidades aquíferas a partir de dados do cadastro de poços de exploração subterrânea. Ensaio de aplicação: área urbana de São Carlos – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2017. Anais... Campinas: ABAS, 2017, 19p. Acesso em 30 nov.2019. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28692>>

SOARES, J. J.; SILVA, D. W. da; LIMA, M. I. S. Current State and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo State, **Brazil. Braz. J. Biol.**, 2003,v. 63, n. 3.

STANTON, Jennifer S.; DENNEHY, Kevin F. **Brackish groundwater and its potential to augment freshwater supplies**. 2017. USGS Publications Warehouse. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20173054>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

WALM, Engenharia e Tecnologia Ambiental – **Relatório de Avaliação Hidrogeológica dos Aquíferos Subterrâneos e Superficiais do Município de São Carlos** - Contrato SAAE 01/2000.