

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA HÍDRICA NO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL – PR

*Gustavo Barbosa Athayde<sup>1</sup> ; Camila de Vasconcelos Müller<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas – LPH / UFPR*

*gustavo.athayde@ufpr.br ; camilavmuller@ufpr.br*

**RESUMO** – Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é a denominação utilizada para referir-se ao aquífero fraturado, de origem vulcânica, representado pelas propriedades petrofísicas da Formação Serra Geral, que ocorre, dentre outros estados e países, no terceiro planalto paranaense. Este aquífero contribui com o abastecimento de mais de 50% dos municípios do estado. O objetivo desta pesquisa compreendeu caracterizar e cartografar áreas mais produtivas no aquífero (potenciais à locação de poços tubulares com elevada produtividade), e onde a qualidade da água seja propícia ao abastecimento humano. Para definir estas áreas, foram integrados mapas (capacidade específica e Índice Relativo de Risco), a partir de técnicas de geoprocessamento como a álgebra de mapas. Trinta e cinco municípios estão localizados em áreas com potencialidades excelentes e muito boas. Destaca o predomínio de áreas potenciais na Bacia do Paraná 3 e de maneira secundária em porções da Bacia do Rio Piquiri. Conhecer as áreas potenciais à captação permite integrar estes dados aos municípios onde existe aumento da demanda (consumo humano, industrial, agricultura, dentre outros), contribuindo com a resiliência hídrica.

**ABSTRACT**– Serra Geral Aquifer System (SASG) is the name used to refer to the fractured aquifer, of volcanic origin, represented by the petrophysical properties of the Serra Geral Formation, which occurs, among other states and countries, in the third plateau of Parana. This aquifer contributes with the supply of more than 50% of the municipalities of the state. The objective of this research was to characterize and map more productive areas in the aquifer and where water quality is conducive to human supply. To define these areas, maps (Q/s and Relative Risk Index) were integrated, using geoprocessing techniques such as map algebra. Thirty-five municipalities are located in areas with excellent and very good potentialities. It highlights the predominance of potential areas in the Paraná Basin 3 and in a secondary way in portions of the Piquiri River Basin. Knowing the potential areas allows integrating these data to municipalities where there is an increase in demand (human consumption, industrial, agriculture, among others), contributing to the increase of water resilience.

**Palavras-Chave** – Capacidade Específica, Índice Relativo de Risco, Sistema Aquífero Serra Geral.

---

1) Afiliação: Times New Roman, 8 pt com endereço completo, fone, fax e e-mail

## INTRODUÇÃO

Conhecer as áreas com maior favorabilidade de perfuração de poços tubulares profundos que apresentem produções elevadas, permite ao gestor público realizar um correto gerenciamento do aquífero. Conhecer também aquelas áreas onde o risco exploratório é mais elevado, traz subsídio técnico aos tomadores de decisão em programas de gestão dos recursos hídricos.

Comparar áreas potenciais no aquífero com a presença de municípios onde existe elevada demanda, permite fornecer subsídios científicos para tomadas de decisão.

Também ajuda a aumentar a resiliência hídrica, devido antecipar situações problemáticas, como cidades com grande aumento populacional em zonas com baixa disponibilidade hídrica subterrânea.

A área de ocorrência do SASG no Paraná corresponde a aproximadamente 109.000km<sup>2</sup>, as espessuras máximas atingem até 1.347 metros, no município de Cianorte – PR. Compreendendo as seguintes bacias hidrográficas do Paraná: Cinzas, Tibagi, Pirapó, Paranapanema 1,2 e 3, Ivaí, Piquirí, Paranapanema, Paraná 3 (BP3) e Iguaçu. No Estado do Paraná, o SASG está em contato com duas unidades aquíferas: Aquífero Guarani e Aquífero Caiuá (Figura 1). Frente a sua extensão territorial e qualidade das águas, o SASG se destaca no Estado do Paraná, como um dos aquíferos mais importantes e estratégicos para o abastecimento público. A escolha de trabalhar com o SASG se deve a importância social e econômica deste aquífero para o estado do Paraná.

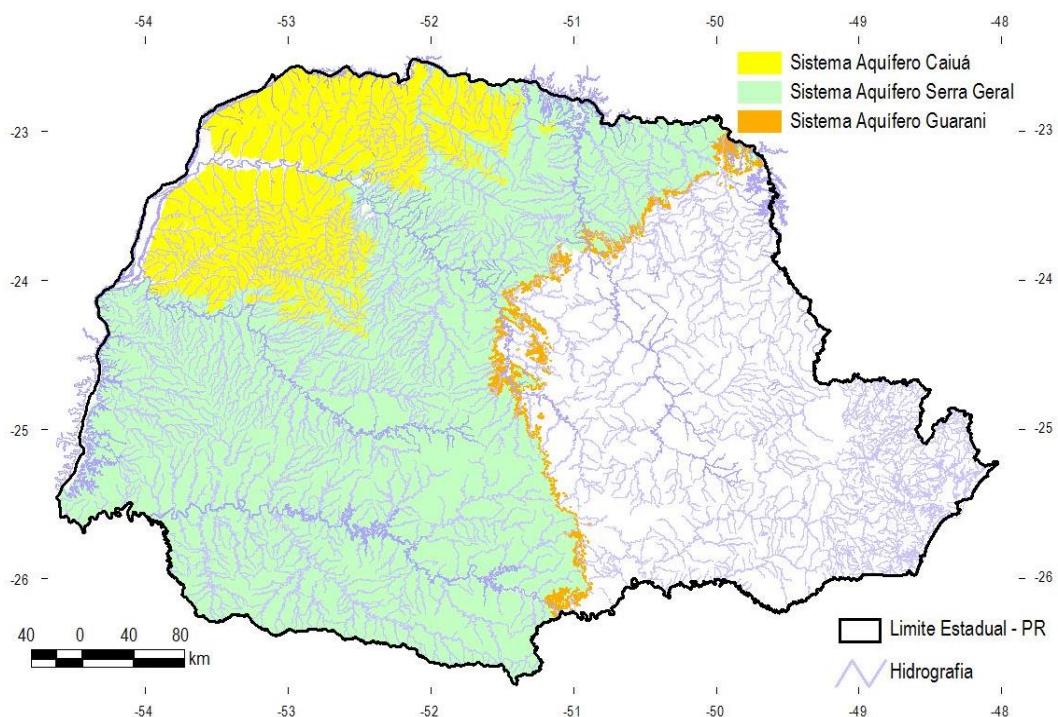


Figura 1- Unidades Aquíferas em contato com o SASG no Estado do Paraná. (Athayde, 2013).

## MATERIAL, MÉTODOS E RESULTADOS

Na cartografia da potencialidade do Aquífero Serra Geral (ASG), nesta pesquisa, foram utilizados 1.625 poços tubulares profundos.

A profundidade perfurada variou entre 10 e 795 metros, com mediana de 120 metros. A mediana da vazão é  $9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , com valor mínimo de  $0,2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e valor máximo de  $250 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ . Em termos estatísticos, o valor do primeiro quartil (percentil 25) é  $4 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e, o valor do terceiro quartil (percentil 75) é  $24 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ .

O rebaixamento dos poços possui mediana de 22,6 metros, com valor de 9,4 metros para o primeiro quartil (Q1) e 47 metros para o terceiro quartil (Q3).

Os parâmetros hidrodinâmicos e construtivos dos poços tubulares profundos que captam o SASG são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros hidrodinâmicos e construtivos dos poços tubulares profundos que captam o Aquífero Serra Geral.

Variáveis	Vazão	N.D.	N.E.	Capacidade específica	
Unidade	( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ )	(m)	(m)	( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ) $\text{m}^{-1}$	
<b>Valor máximo</b>	250,0	280,0	195,8	45,0	
<b>Percentil</b>	<b>99</b>	156,3	204,0	20,52	
	<b>98</b>	122,5	190,0	14,16	
	<b>97</b>	100,0	180,0	10,83	
	<b>95</b>	80,0	160,0	7,18	
	<b>93</b>	70,0	140,0	5,58	
	<b>91</b>	60,0	128,0	4,61	
	<b>90</b>	55,0	120,0	4,22	
	<b>85</b>	40,0	100,0	3,00	
	<b>75</b>	24,0	79,7	33,5	1,62
	<b>65</b>	15,0	65,0	25,2	1,02
	<b>50</b>	9,0	49,0	16,0	0,54
	<b>40</b>	6,5	39,7	11,0	0,36
	<b>25</b>	4,0	28,0	6,2	0,16
	<b>15</b>	3,0	20,0	4,2	0,08
	<b>5</b>	1,5	12,0	2,2	0,03
<b>Valor mínimo</b>	0,2	2,3	0,2	0,01	

### Capacidade específica

A mediana da capacidade específica para os 1.625 poços que captam o SASG é  $0,54(\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ , com valor mínimo de  $0,01(\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$  e valor máximo de  $45(\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ . Sendo que, o valor da

capacidade específica equivale a  $0,16(\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$  para o primeiro quartil (Q1) e  $1,62 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$  para o terceiro quartil (Q3).

Assim como ocorre com os dados de vazão, a capacidade específica também apresenta um zoneamento de produtividade, predominando poços mais produtivos na “Província Hidroestrutural Jacutinga Noroeste”, proposta por Athayde et al., (2012), com destaque para a Bacia Hidrográfica do Paraná 3 (BP3), no extremo oeste da unidade aquífera.

A região da bacia hidrográfica do rio Iguaçu apresenta o maior risco exploratório do SASG, no Paraná. Com a exceção de poços localizados na porção jusante desta bacia hidrográfica, região sudoeste do estado, onde ocorrem poços tubulares com valores elevados de capacidade específica, ou seja, acima de  $7,15 (\text{m}^3\text{h}^{-1})\text{m}^{-1}$ .

O mapa com a espacialização da capacidade específica do SASG é visualizado na Figura2.

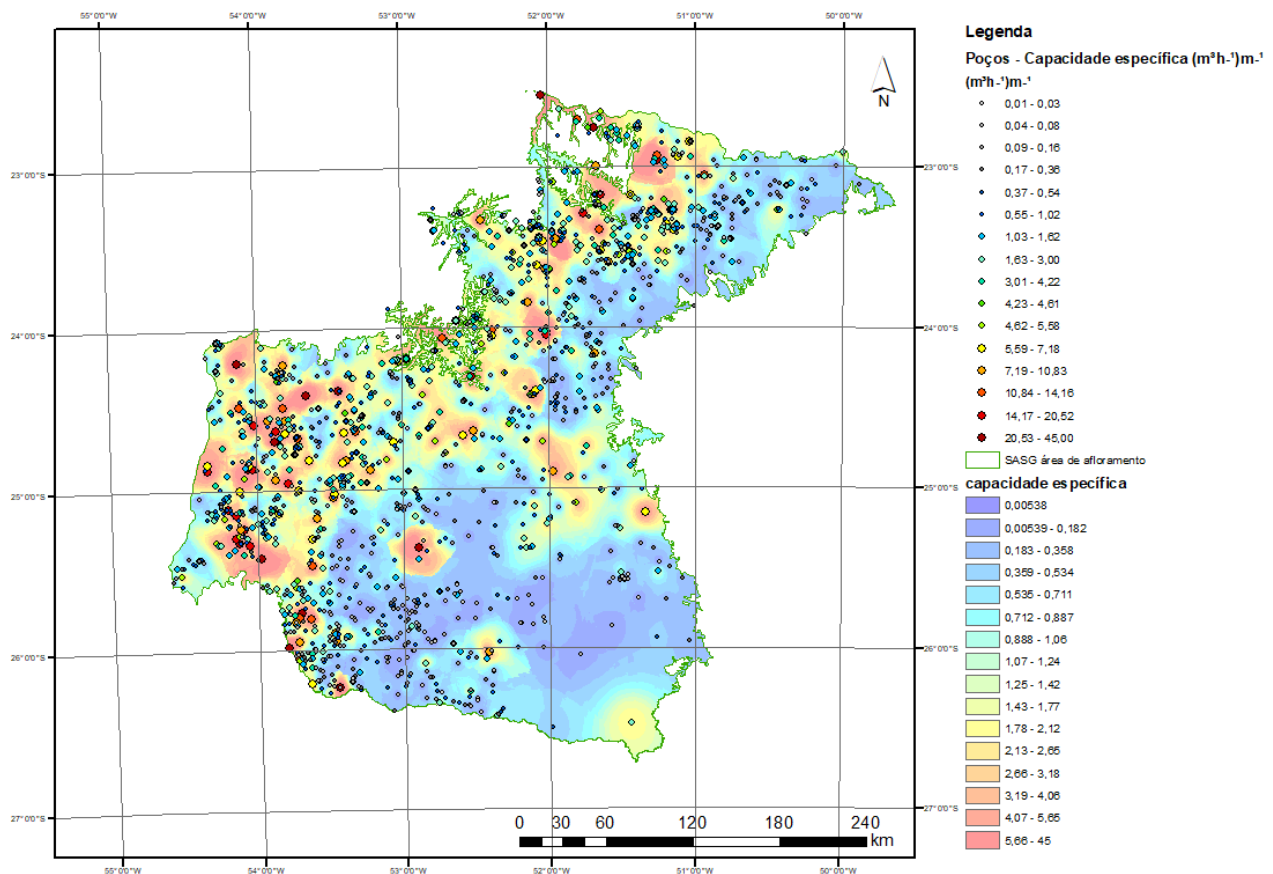


Figura 2 : Mapa com a espacialização da capacidade específica no SASG.

## Índice relativo de risco

Athayde (2014) propõe o método do Índice Relativo de Risco – IRR, utilizado para a análise hidroquímica deste trabalho. O método correlaciona concentrações de parâmetros físico-químicos

encontrados nos poços com os valores máximos permitidos para consumo humano encontrados na legislação (

Tabela2) e está descrito abaixo.

Neste trabalho, os dados utilizados para análise foram as concentrações de bicarbonato, cálcio, carbonato, cloreto, ferro, fluoreto, fosfato, magnésio, potássio, sílica, sódio e sulfato, a alcalinidade, a condutividade elétrica, a dureza, o pH e o total de sólidos dissolvidos. Os demais dados disponíveis não foram analisados devido à falta de valores orientadores disponíveis.

Os valores obtidos para cada parâmetro são comparados com valores de referência definidos através da legislação nacional e internacional para a potabilidade da água. Estes valores de referência são chamados Valores Máximos Permitidos (VMP) e são preferencialmente retirados de fontes nacionais, optando-se por internacionais apenas quando não houver orientações nacionais.

Dentre os parâmetros inicialmente propostos, cinco não foram encontrados na legislação e não são utilizados no cálculo do IRR (bicarbonato, carbonato, fosfato, potássio e sílica). Os valores de pH, por terem como parâmetro um intervalo de valores e não um valor específico e por serem facilmente corrigidos por tratamentos simples, também não é utilizado no cálculo.

Poços que apresentem qualquer parâmetro acima do seu respectivo VMP para consumo humano já apresentam risco à saúde e foram eliminados da análise.

O IR para cada poço é calculado através da soma dos Quocientes (Q) da concentração de cada parâmetro com o respectivo VMP. O IR é calculado para cada um dos 337 poços do estudo e, após o tratamento estatístico o IRR é definido. A Figura 3 demonstra o funcionamento da técnica.

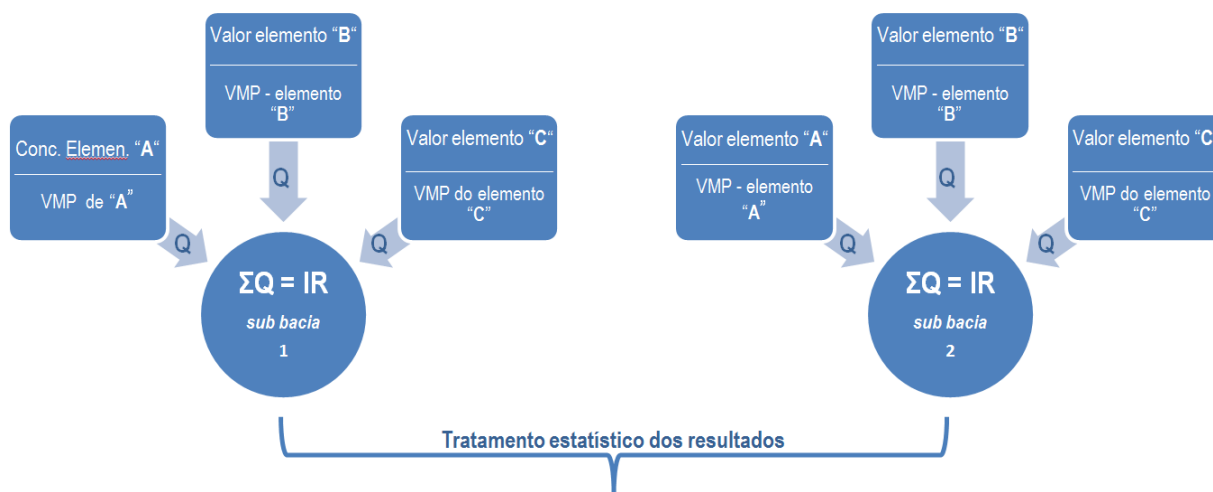


Figura 3: Fluxograma do cálculo do IRR aplicado para bacias que não apresentaram risco, na comparação inicial com valores orientadores.



Tabela 2: Relação dos parâmetros analisados, seus valores máximos permitidos e suas referências

Parâmetros com os respectivos valores máximos permitidos em (mg/L)			
Parâmetro	Símbolo	VMP (mg/L)	Referência
Cloreto	Cl <sup>-</sup>	250	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Condutividade elétrica		2.500 ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a 20° C)	DC 98/83/CE (UE, 1998)
Dureza		500	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Ferro	Fe	0,3	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Fluoreto	F <sup>-</sup>	1,5	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Nitrito	N·NO <sub>3</sub>	1	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Nitrato	N·NO <sub>2</sub>	40	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
pH		6,5-8,5	USEPA (2009)
Sódio	Na	200	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Sulfato	SO <sub>4</sub>	250	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Total de sólidos dissolvidos		1000	PRT 2914/11 (Brasil,2011)

### Cartografia das potencialidades hidrogeológicas no SASG paranaense

O significado de áreas com potencialidades hidrogeológicas distintas pode ser assim resumido:

Áreas com alto potencial: possuem poços tubulares com capacidades específicas elevadas e boa qualidade físico-química [ou baixo Índice Relativo de Risco (IRR), neste caso].

Áreas com baixo potencial: os poços tubulares possuem baixos valores de capacidade específica (menor que o primeiro quartil), e elevado risco com relação a qualidade das águas.

A sequência de procedimentos executada para determinar as áreas potenciais à captação de água subterrânea para consumo humano, pode ser observada na Figura 4.



Figura 4: Fluxograma dos procedimentos realizados na seleção de áreas potenciais à captação.

O primeiro passo é consistir os dados hidrogeológicos, neste caso representados por valores de capacidade específica (padronizada para 12 horas de teste de bombeamento), 337 análises físico-químicas e dados de trabalhos anteriores.

Na segunda etapa, processamento dos dados, é calculado o índice relativo de risco e, em conjunto com os valores de capacidade específica, foram elaborados mapas com a distribuição espacial destes parâmetros. Estes mapas foram reclassificados e a partir de uma álgebra de mapas, e cartografadas às áreas mais e menos favoráveis à captação. A reclassificação foi subsidiada pelos intervalos dos seguintes percentis: valor mínimo ao 25%, 25 a 50%, 50 a 75% e 75 até valor máximo.

Os valores de capacidade específica foram separados em percentil, assim como os valores do IRR, e integrados de maneira que sua multiplicação permita classificar o território segundo sua potencialidade à captação (Figuras 5 e 6, respectivamente). Ambos os parâmetros tiveram seus valores reclassificados para: 1, 10, 100 e 1000.

A matriz de correlação que foi aplicada na reclassificação dos mapas, mediante o uso de geoprocessamento, visando determinar as diferentes aptidões do SASG é apresentada na Figura 7.

Cabe ressaltar que o SASG é um sistema anisotrópico, e que a geração de rasters para representar sua distribuição deve ser utilizada com cautela. Consideramos que a escala regional, e o comportamento como meio poroso equivalente deva ser assumido, nesta escala, para uso do método proposto.

O comportamento do SASG é de aquífero livre, o que permite utilizar ferramentas de geoprocessamento, com o objetivo de estimar espacialmente a distribuição de diferentes parâmetros, os quais integrados, representam as distintas potencialidades do aquífero, para fins de captação destinada ao consumo humano.

A terceira etapa consiste em selecionar áreas que possuem alto potencial para captação, sugerindo ações de proteção e/ou gestão.

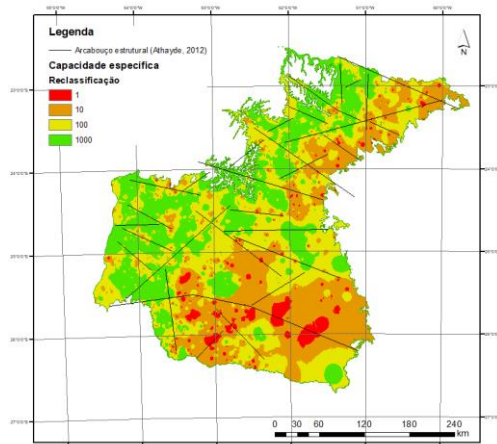


Figura 5 : Mapa com os valores reclassificados de capacidade específica

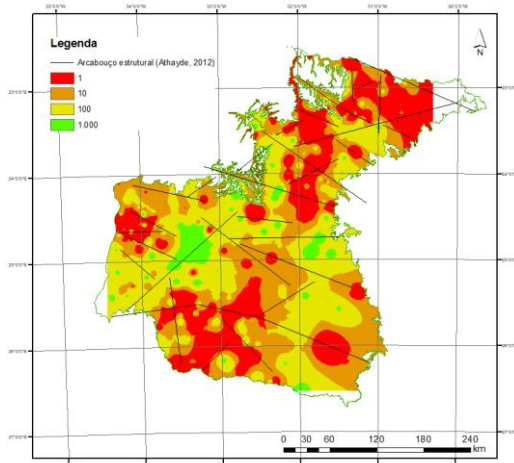


Figura 6: Mapa com os valores reclassificados do IRR

Índice Relativo de Risco	Capacidade Específica ( $m^3h^{-1}$ ) $m^{-1}$			
	Cap. Esp 75 – 100% (1,62 a 44,97) Reclassificação: 1000	Cap. Esp 50 – 75% (0,54 a 1,62) Reclassificação: 100	Cap. Esp 25 – 50% (0,16 a 0,54) Reclassificação: 10	Cap. Esp 0 – 25% (0,005 a 0,16) Reclassificação: 1
<b>IRR 0 – 25% (0,2 a 0,6)</b> Reclassificação: 1000	EXCELENTE Resultado: 1.000.000	MUITO BOM Resultado: 100.000	BOM Resultado: 10.000	MODERADO Resultado: 1.000
<b>IRR 25 – 50% (0,6 a 0,9)</b> Reclassificação: 100	MUITO BOM Resultado: 100.000	BOM Resultado: 10.000	MODERADO Resultado: 1.000	RUIM Resultado: 100
<b>IRR 50 – 75% (0,9 a 1,1)</b> Reclassificação: 10	BOM Resultado: 10.000	MODERADO Resultado: 1.000	RUIM Resultado: 100	PÉSSIMO Resultado: 10
<b>IRR 75 – 100% (1,1 a 6,9)</b> Reclassificação: 1	MODERADO Resultado: 1.000	RUIM Resultado: 100	PÉSSIMO Resultado: 10	NÃO RECOMENDADO Resultado: 1

Figura 7: Matriz utilizada na reclassificação dos mapas.



Para chegar ao objetivo proposto, ou seja, a delimitação de áreas potenciais a captação de água subterrânea para consumo humano, foi realizada da álgebra de mapas descrita no capítulo de métodos, que pode ser resumida simplesmente como a multiplicação pixel a pixel dos valores reclassificados de capacidade específica e IRR.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra esta álgebra de mapas. Visando traçar uma condição preliminar de relação oferta versus demanda foi elaborado o mapa apresentado na Figura 9. Neste mapa é apresentado a sobreposição das zonas urbanas (potenciais consumidores) e as áreas classificadas como excelentes e muito boas à captação.

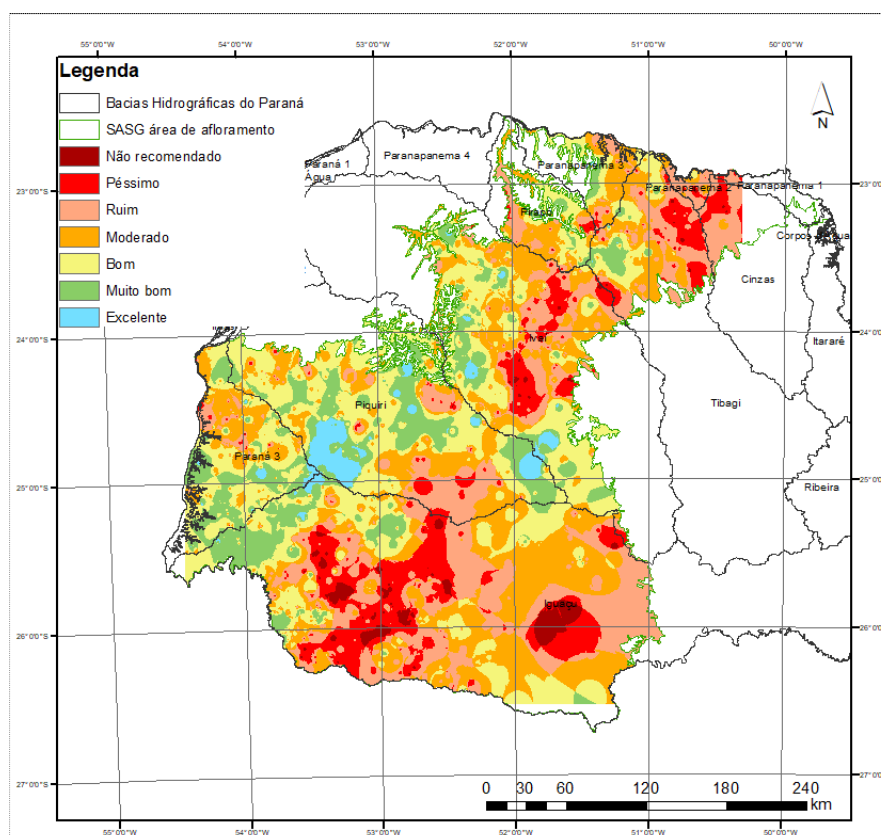


Figura 81: Sobreposição das bacias hidrográficas com a classificação das áreas segundo a potencialidade para consumo humano.

Trinta e cinco municípios estão localizados em áreas com potencialidades excelentes e muito boas. São eles: Anahy, Apucarana, Assis Chateaubriand, Braganey, Cafelândia, Campina do Simão, Campo Mourão, Capitão Leônidas Marques, Corbélia, Florestópolis, Formosa do Oeste, Iguatu, Iracema do Oeste, Itaipulândia, Jesuítas, Lindoeste, Luiziana, Matelândia, Medianeira, Miraselva, Peabiru, Pitanga, Prado Ferreira, Pranchita, Santa Helena, Santa Maria do Oeste, Santa Tereza do Oeste, São Carlos do Ivaí, São Miguel do Iguaçu, São Pedro do Iguaçu, Serranópolis do Iguaçu, Terra Boa, Terra Roxa, Toledo e Tupãssi.

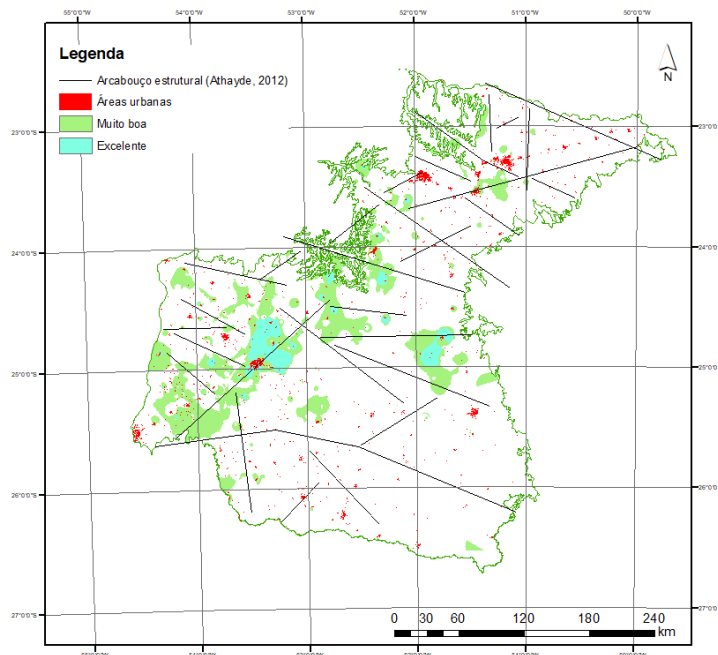


Figura 9: Sobreposição das zonas urbanas sobre as áreas com potencialidades excelentes e muito boas.

## CONCLUSÕES

A cartografia multitemática aplicada à água subterrânea contribui no gerenciamento do aquífero, retribuindo para a sociedade, no aumento da resiliência hídrica, uma vez que o SASG possui importante papel no desenvolvimento econômico e, principalmente, no abastecimento público dos municípios situados em sua área de afloramento.

**AGRADECIMENTOS** - Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio mediante projeto universal nº 446685/2014-3, intitulado: Mapeamento multifinalitário no Sistema Aquífero Serra Geral, Estado do Paraná: áreas potenciais à captação para consumo humano, e vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero, coordenado pelo Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde.

## REFERÊNCIAS

- Athayde, G. B.; Athayde, C. V. M. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná**. Revista brasileira de águas subterrâneas v. 29, n 3, 2015, p 315 – 333.
- Athayde, C. M.; Athayde, G.B.; Licht, O.A.B.; Rosa Filho, E.F.DA. **Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público**. Boletim Paranaense de Geociências, v. 71, n. 1, p. 21-36, 2014.