

## **Carta de Fragilidade Ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do rio Clarinho, SP**

**Environmental Fragility chart as an instrument for planning and conservation of aquifer units: the case of Clarinho river watershed, SP**

*João Vitor Roque Guerrero*

Geógrafo, Doutorando em Ciências Ambientais – UFSCar, Brasil  
[jvguerrero2@gmail.com](mailto:jvguerrero2@gmail.com)

*José Augusto de Lollo*

Engenheiro Geólogo – Prof. Titular da UNESP, Brasil  
[jlollo@gmail.com](mailto:jlollo@gmail.com)

*Luiz Eduardo Moschini*

Biólogo – Prof. Associado da UFSCar, Brasil  
[lemoschini@ufscar.br](mailto:lemoschini@ufscar.br)

*Reinaldo Lorandi*

Geólogo – Prof. Associado da UFSCar, Brasil  
[lorandir@gmail.com](mailto:lorandir@gmail.com)

### **Resumo**

Nas últimas décadas a falta de planejamento territorial das ações humanas e a sobre-exploração dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de São Paulo têm causado a poluição, contaminação e o exaurimento destes recursos vitais. A partir desta premissa, este trabalho apresenta uma adaptação da carta de Fragilidade Ambiental dos Ambientes Antropizados, originalmente proposta por Ross, com o objetivo de diagnosticar as fragilidades do território permitindo a aplicação de propostas de planejamento e conservação sustentáveis de unidades aquíferas na bacia hidrográfica do rio Clarinho, em Santa Rita do Passa-Quatro, SP. Foram utilizados dados geograficamente espacializados de Landforms, Declividades, Formações Geológicas Superficiais, Substrato Rochoso e Uso do Solo para relacionar os aspectos do meio físico com o atual padrão de ocupação antrópico na bacia. A metodologia foi sistematizada através da lógica Fuzzy, onde valores de potencial de contaminação foram atribuídos para todos os atributos de cada dado utilizado. Os resultados obtidos demonstraram que a maior parte da bacia se encontra em situação de Forte e Muito Forte fragilidade ambiental das unidades aquíferas, demonstrando a pressão a que estes recursos estão expostos e gerando a necessidade de um planejamento territorial que limite usos potencialmente contaminadores sobre as áreas mais frágeis.

**Palavras-chave:** Águas Subterrâneas, SIG, Planejamento Territorial.

### **Abstract**

In the last decades the lack of territorial planning of human actions and the overexploitation of groundwater resources in the State of São Paulo have caused pollution, contamination and the exhaustion of these vital resources. Based on this premise, this work presents an adaptation of the Environmental Fragility letter of the Anthropized Environments, originally proposed by Ross, with the objective of diagnosing the fragilities of the territory allowing the application of sustainable planning and conservation proposals of aquifer units in the hydrographic basin of Clarinho river, in Santa Rita do Passa-Quatro, SP. Landforms, Declines, Surface Geological Formations, Rocky Substrates and Land Use were used to relate aspects of the physical environment to the current pattern of anthropic occupation in the basin. The methodology was systematized through fuzzy logic, where

potential contamination values were assigned to all attributes of each data used. The results showed that most of the basin is in a situation of Strong and Very Strong environmental fragility of the aquifer units, demonstrating the pressure to which these resources are exposed and generating the need for a territorial planning that limits potentially contaminating uses on the areas more fragile.

**Keywords:** Underground Water; GIS, Territorial Planning.

## 1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um dos principais recursos naturais existentes, por sua capacidade de abastecer de forma vital comunidades, disponibilizar alimentos através da agricultura e permitir as atividades industriais, representando 26% das reservas de água doce do mundo (SENER, et.al., 2017; RHAMATI et.al., 2016; ELBEIH, 2014).

Atualmente, a disponibilidade de água de qualidade para estas diversas atividades vem decrescendo em todo o planeta, graças principalmente a diversas ações antropogênicas e eventos naturais degradadores (SENER et al., 2017). Os principais atos realizados pelos seres humanos que contribuem para o decréscimo da qualidade das águas subterrâneas são a super-exploração e a contaminação dos recursos.

A exploração excessiva dos recursos, feita sem respeitar as características do aquífero, tende a exauri-lo, tornando a atividade economicamente e ambientalmente inviável, já a contaminação dos aquíferos está intimamente ligada às atividades na superfície que lançam agentes degradantes no solo (HIRATA; VIVIANI-LIMA; HIRATA, 2009)

Outro fator agravante é que as variações e mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global prejudicam de forma direta as águas subterrâneas através das alterações do reabastecimento por recarga e indiretamente pelas mudanças nos padrões de uso dos aquíferos (TAYLOR, 2012).

O caso brasileiro é bastante preocupante já que muitos dos corpos hídricos superficiais foram exauridos, super-explorados ou contaminados, fazendo com que grande parte das atividades de consumo humano seja muito dependente das águas provenientes do subsolo.

Levando-se em conta a importância da água subterrânea e dos problemas que este recurso vem enfrentando nos últimos anos, principalmente no Brasil, projetos e programas de planejamento territorial que visem a conservação dos recursos hídricos são necessários, afim de mitigar os problemas existentes e evitar que novos ocorram.

Dentro deste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas e o Sensoriamento Remoto tem se provado ferramentas extremamente eficientes no planejamento e gestão de águas subterrâneas (OIKONOMIDIS et al., 2015), e diversos trabalhos comprovam esta afirmação, tais como Sener et.al.(2017), Hornero et al. (2016), Tanajura e Leite (2016), Duarte et al. (2014).

Uma das formas de compatibilizar as geotecnologias ao planejamento territorial que mais vem sendo difundidas no Brasil é a aplicação da metodologia da Fragilidade Ambiental dos Ambientes

Antropizados proposta por Ross (1994). Esta é uma abordagem que parte do princípio de que os ambientes naturais se encontravam em equilíbrio dinâmico, e tal equilíbrio só foi alterado a partir das intervenções antrópicas intensas sobre o meio. Sendo assim, os recursos naturais somente devem ser utilizados segundo critérios técnicos dentro de uma política de aplicação conservacionista, o que vai de encontro com a necessidade de preservação das águas subterrâneas (ROSS, 1994)

Em um cenário atual de alterações climáticas e ambientais globais que vêm acarretando a super-exploração e conseqüente contaminação dos recursos hídricos subterrâneos a carta de fragilidade ambiental pode atuar como um instrumento de planejamento das unidades aquíferas a medida que pode prever cenários e propor ações mitigadoras.

Nesse contexto, o trabalho avaliou a Fragilidade Ambiental na bacia hidrográfica do rio Clarinho, estado de São Paulo, a partir da perspectiva da proteção e conservação das unidades aquíferas presentes no local, buscando propor medidas de planejamento territorial para a bacia com base na integração dos atributos do meio físico local.

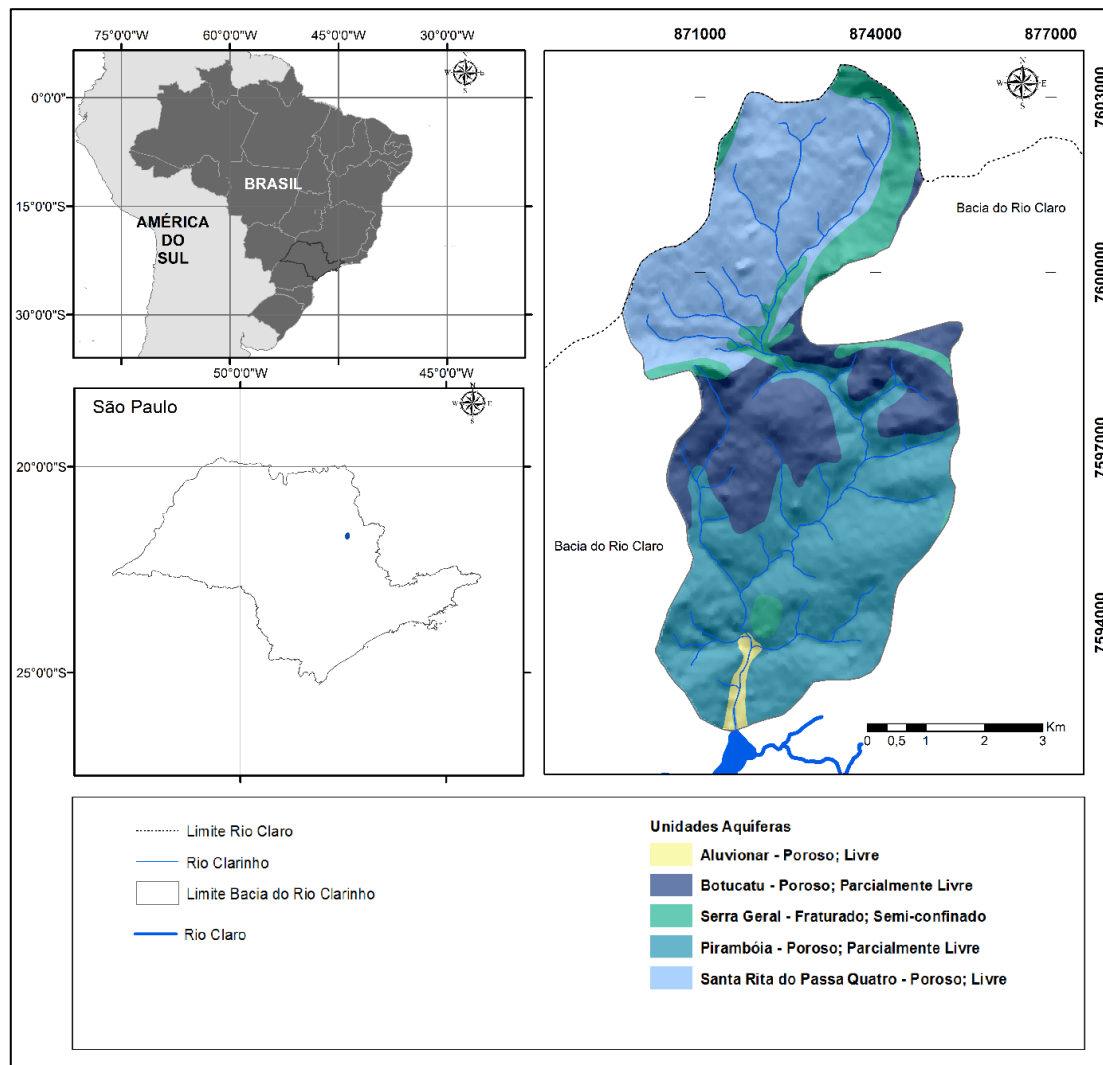
A escolha da bacia Hidrográfica do rio Clarinho deu-se pois esta é de especial interesse à região, já que é o principal afluente do rio Claro, que é o responsável pelo abastecimento de água da região. Além do mais, diversos conflitos de uso do solo expuseram a bacia à processos de degradação de alto impacto, tais como grandes erosões.

Por fim, espera-se que a aplicação metodológica nos moldes deste trabalho possa ser reaplicada a outras bacias hidrográficas para a realização de um planejamento territorial com bases sustentáveis.

## **2. MATERIAIS E MÉTODO**

### **2.1. Área de Estudo**

A área de estudo deste trabalho contempla a bacia hidrográfica do rio Clarinho, que apresenta uma extensão total de 40,5 km<sup>2</sup> e localiza-se na porção Nordeste do Estado de São Paulo (Figura 1) estando totalmente inserida no município de Santa Rita do Passa Quatro. Atualmente o município apresenta uma população de 26.478 habitantes (IBGE, 2010) e densidade demográfica de 34,72 hab./km<sup>2</sup>. O rio Clarinho é um dos maiores afluentes do Rio Claro, que é considerado um rio de classe 2 e que é caracterizado por apresentar de médio a muito alto potencial hidrogeológico (LORANDI et al., 2014). Em macro escala tanto a bacia do rio Claro, quanto a bacia do rio Clarinho encontram-se na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu, pertencente à Região Hidrográfica do Paraná (LORANDI et al., 2014).



**Figura 1:** Mapa de Localização da bacia do rio Clarinho

**Fonte:** Autores, 2018

Quanto ao uso do solo, é possível afirmar que a mata nativa foi substituída por diversas atividades agropecuárias, principalmente pela cana-de-açúcar e a silvicultura de eucaliptos. Mesmo com a intensa devastação ainda são encontrados fragmentos de mata provenientes de áreas de preservação e reflorestamentos.

O clima da região é classificado como mesotérmico úmido subtropical de inverno seco com distinção entre as estações seca e chuvosa.

O substrato rochoso é predominantemente formado pelas formações Piramboia (TRp), Botucatu (JKb) e Intrusivas Básicas (V) (GUERRERO et al., 2016). A formação Piramboia é representada por arenitos de granulometria muito fina a média com ocorrência sazonal de clastos grosseiros de grãos subarredados. Já a formação Botucatu é formada por arenitos muito finos a médios de textura bastante variável que raramente ultrapassam os 150m. Por fim, a formação Intrusivas Básicas representa o conjunto de derrames basálticos de textura afanítica que contém intercalações de lentes e camadas arenosas de textura fina a média com estratificação cruzada.

As formações geológicas de superfície são provenientes da estrutura geológica da bacia, tendo 5 classes identificadas por Guerrero et.al., (2014): Botucatu, Quaternário, Piramboia, Santa Rita do Passa-Quatro e Intrusivas Básicas. A unidade classificada como Quaternário é basicamente formada por sedimentos depositados ao longo dos recursos hídricos e é classificada como uma formação geológica de superfície retrabalhada proveniente da formação Pirambóia. A unidade Botucatu apresenta materiais residuais provenientes da formação homônima e contém areias com poucos finos, solos saprolíticos silto-arenosos e argilas arenosas. Os Magmatitos da região são derivados de rochas intrusivas e são solos argilosos e areno-argilosos e podem ser encontrados na área de escarpas, platôs e nas encostas côncavas e convexas. Já a unidade Pirambóia está localizada predominantemente na região sul da bacia ao longo das encostas convexas e alguns vales, contendo textura predominantemente arenosa. Por fim, a unidade Santa Rita do Passa-Quatro corresponde a uma textura bastante arenosa localizada na porção noroeste da bacia.

Quanto às formas de relevo, Guerrero et.al. (2014) identificaram cinco unidades de terreno: Platô, Escarpa, Vale, Encosta Côncava, e Encosta Convexa. Os platôs são caracterizados por pequenos morrotes e médios alongados e alinhados com declividades médias e baixas. Já a unidade de escarpas apresenta como principal característica as altas declividades com densidade de canais alinhados. As Encostas Convexas apresentam colinas médias e pequenas, média densidade de canais, declividades de até 10% e em suas áreas superiores representam áreas de recarga para os sistemas aquíferos. A unidade das encostas côncavas é caracterizada pela presença de colinas médias com baixa densidade de canais e baixas declividades. Os vales são pequenos com declividades abaixo dos 5%, mais fechados nas regiões das nascentes e mais abertos no baixo curso dos canais de drenagem, onde estão localizados também depósitos aluviais expressivos.

De acordo com Lorandi (2014), a bacia hidrográfica do rio Clarinho contém cinco unidades aquíferas: Aluvionar, Botucatu, Intrusivas Básicas, Pirambóia e Santa Rita do Passa Quatro. O aquífero Aluvionar é proveniente dos Depósitos Recentes do Quaternário, ocorrendo principalmente em fundos de vale da região com depósitos de sedimentos e matéria orgânica, tendo como características principais ser sedimentar, livre e poroso, e está localizado no extremo sul da bacia (LORANDI et al., 2014). O Aquífero Botucatu é formado por arenitos uniformes de granulação fina a média, apresentando alta porosidade devido à gênese de seu material formador. Esta formação apresenta no local característica parcialmente livre, sendo encontrada na porção norte da bacia (IPT, 7981). A relevância da formação Botucatu passa pela grande fragilidade que tem quanto ao potencial de contaminação, já que seus arenitos de granulação média permitem o maior fluxo de água até o subsolo. Já o aquífero Serra Geral (Intrusivas Básicas) é derivado de derrames de lava vulcânica, sendo formado, portanto, por rochas basálticas da formação Serra Geral. Essas rochas são duras e compactas, sendo assim as aberturas que favorecem o armazenamento da água foram geradas quando

houve o resfriamento dos derrames de lava (LORANDI et.al., 2014; IRITANI & EZAKI, 2008). O aquífero Santa Rita do Passa Quatro tem origem sedimentar e apresenta como características principais a porosidade, permeabilidade além de ser considerado livre, demonstrando sua fragilidade quanto a contaminação por atividades antrópicas. Por fim, a Unidade Aquífera Piramboia é constituída por arenitos de granulação fina a média, porém possui quantidades significativas de argila em sua parte inferior (MENDONÇA & GUTIERRE, 1998). Sendo assim, este aquífero é relativamente poroso e tem característica parcialmente livre, podendo ser encontrado na região central e no sul da bacia (LORANDI et al., 2014).

## 2.2. Materiais

A aplicação da metodologia de Ross (1994) exige estudos básicos do meio físico tais como relevo, geologia, solos, uso do solo, dentre outros, gerando assim a necessidade da aquisição/produção de materiais cartográficos que contemplem estes atributos. Os materiais primários e secundários utilizados neste trabalho são demonstrados na tabela (1):

**Tabela 1:** Materiais Utilizados

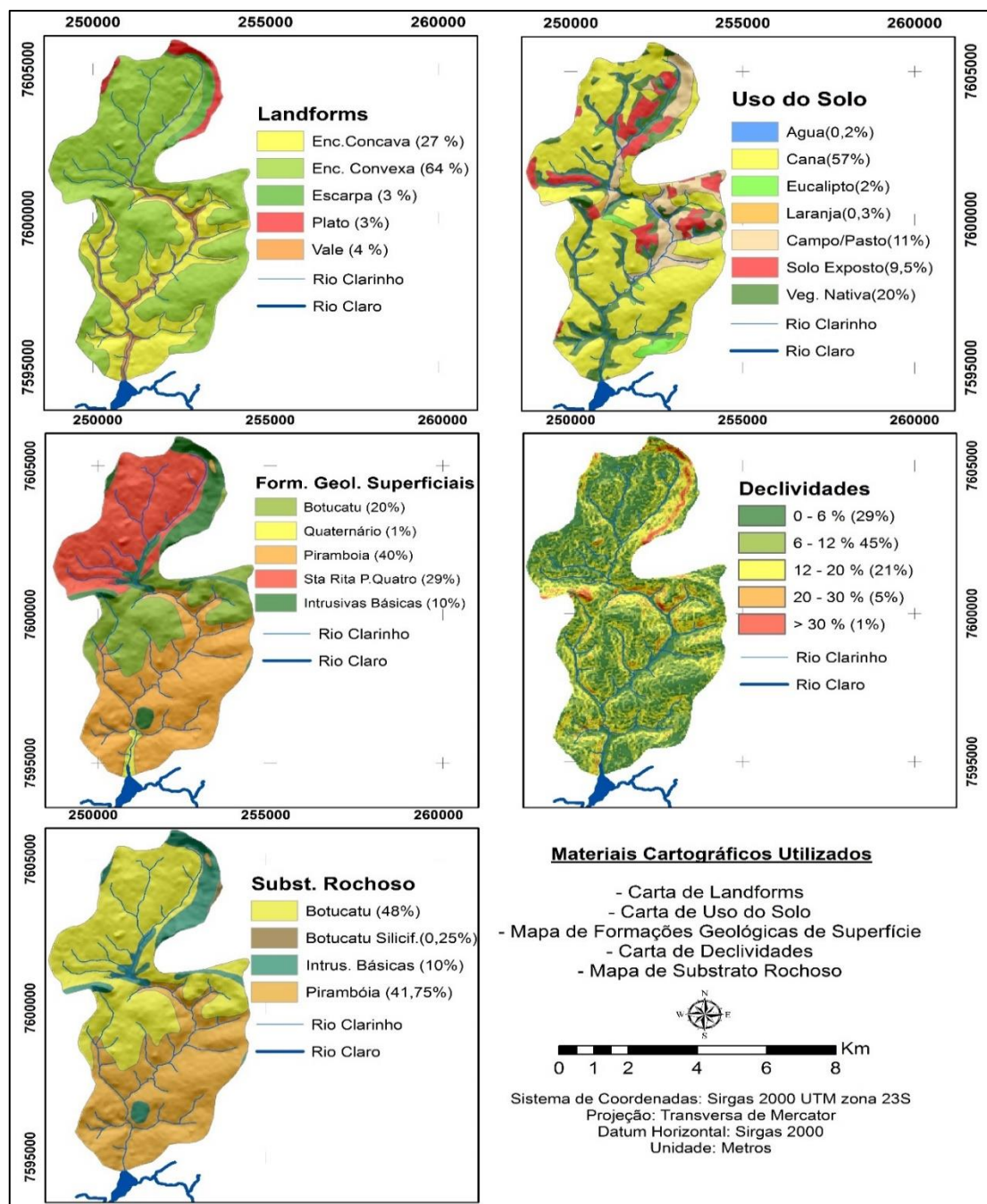
Material	Fonte	Escala
<b>Mapa de Substrato Rochoso</b>	IG (1981)	1:50.000
Carta Topográfica - Folha Santa Rita do Passa-Quatro	IBGE (1970)	
<b>Imagem SRTM</b>	USGS (2017)	
<b>Imagem de Satélite LandSat8 Instrumento OLI</b>	Imagem de Satélite LandSat8 Instrumento OLI	
<b>Mapa de Landforms</b>	Guerrero, Lollo e Lorandi (2016)	
<b>Mapa formações geológicas de superfície</b>	Guerrero, Lollo e Lorandi (2016)	
<b>Mapa de Substrato Rochoso</b>	Guerrero, Lollo e Lorandi (2016)	

**Fonte:** Autores, 2018

A carta de Uso do Solo de 2016 foi gerada tendo como base a imagem provinda do sensor OLI (Operational Land Imager) do satélite LandSat8 datada de 05/07/2016. Este produto foi gerado de forma manual onde em cada atributo identificado pelo operador era desenhado um polígono representativo para cada classe (cana, urbano, mata, etc.). Anteriormente a imagem bruta foi pré-processada com procedimentos de correção atmosférica além de uma fusão das bandas pancromáticas (30m de resolução) com a banda monocromática (15m de resolução) para obter uma melhor resolução espacial e facilitar a identificação dos atributos.

Já a carta de declividades foi produzida a partir do Modelo Digital de elevação oriundo da Imagem SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) de 1 arco por segundo e 30m de resolução espacial. O seu pré-processamento consistiu primeiramente em reprojeter a imagem para a projeção e o sistema de coordenadas do projeto e em preencher falhas que o sistema que disponibiliza as imagens ainda não é capaz de sanar, com a ferramenta “Fill” do ArcGis 10.3.1. Por fim, utilizou-se a ferramenta “Slope” para gerar a carta de declividades em porcentagem.

A figura 2 ilustra todos os materiais cartográficos primários (obtidos) e secundários (produzidos) utilizados para a aplicação metodológica:



**Figura 2:** Materiais Cartográficos utilizados

**Fonte:** Autores, 2018

### 2.3. Método

Com o objetivo de propor instrumentos que auxiliem o planejamento de unidades aquíferas foi utilizada a metodologia da análise empírica da “Fragilidade dos ambientes naturais e antropizados”, primeiramente proposta por Ross (1994) baseada na “teoria dos sistemas” expressa por Tricart (1977). Esta teoria é aplicada através de Unidades Ecodinâmicas que buscam avaliar a dinâmica do meio ambiente e dos ecossistemas, visando à conservação e o desenvolvimento dos recursos ecológicos, tais como a água, solo, ar, etc. (TRICART, 1977).

Pode-se considerar, então, que a metodologia da fragilidade ambiental é uma linha de preocupação inicialmente ligada à geomorfologia, aplicável ao planejamento territorial e tem como principal preocupação a qualidade dos recursos naturais, promovendo a ideia de que estes devem ser utilizados pelos seres humanos somente a partir de critérios técnico-científicos e adotando políticas conservacionistas (ROSS, 1994).

O processo de sistematização de todos os atributos levantados para gerar a carta de fragilidade ambiental é originalmente realizado com a aplicação da álgebra booleana, porém, nos últimos anos, diversos trabalhos têm mostrado ineficácia desta abordagem em diversos estudos ambientais, principalmente por limitar os limiares entre as classes em áreas rígidas e pouco dinâmicas (CEREDA JUNIOR; RHOM, 2014; MOREIRA et al., 2001). Com o objetivo de reduzir as discrepâncias ambientais entre as áreas dos atributos, foi escolhida a Inferência Fuzzy para realizar os procedimentos necessários.

A inferência (ou lógica) Fuzzy pode ser caracterizada como um modelo baseado em conhecimento que tem como objetivo principal permitir a caracterização de classes que não tem ou não podem apresentar limites rígidos entre os atributos escolhidos, por exemplo, rios, formações geológicas e formas de relevo (MOREIRA et al., 2001).

Ainda de acordo com a metodologia proposta, a fragilidade ambiental pode ser caracterizada em cinco categorias de análise: Muito fraca, Fraca, Média, Forte e Muito Forte. A partir da definição destas classes de fragilidade, cada atributo analisado recebeu pesos Fuzzy (que variam de zero a um) para seus componentes quanto à fragilidade a que estão suscetíveis, onde os valores mais baixos representam menor suscetibilidade e os valores mais altos representam maior suscetibilidade. Os valores para cada atributo são demonstrados na tabela 2:

Para o substrato rochoso e as formações geológicas de superfície foram definidos os valores quanto ao potencial que cada atributo apresenta para infiltração e consequente contaminação dos aquíferos, ou seja, quanto mais arenoso o material, mais alto o valor atribuído.

A definição de valores dos *Landforms* está relacionada à dinâmica de escoamento superficial e acumulação de cada unidade. As unidades de *landforms* que concentram mais os fluxos receberam



valores 4 e 5 e já aquelas que representam maior escoamento superficial receberam valores de 1 a 3. O mesmo critério foi aplicado às declividades onde, para os menores declives (que representam maior acumulação), foram aplicados os valores mais altos.

**Tabela2:** Atributos utilizados e valores de fragilidade aplicados

Atributo	Classe de Fragilidade				
	Muito Fraca	Fraca	Média	Forte	Muito Forte
Substrato Rochoso	Intrusivas Básicas		Piramboia		Botucatu
Landforms	Escarpa	Encosta Côncava Platô		Encosta Convexa	Vale
Formações Geológicas de Superfície	Intrusivas Básicas		Piramboia	Santa Rita do Passa-Quatro	Botucatu, Quaternário
Declividades	> 30 %	20 a 30 %	12 a 20 %	6 a 12 %	Até 6 %
Uso do Solo	Mata, Corpo Hídrico	Campo/Pastagem, Silvicultura	Laranja	Campo/Pastagem com processos erosivos, Cana-de-Açúcar	Erosão, Solo Exposto

**Fonte:** Autores, 2018 – Adaptado de Ross, 1994,2012

Já para o Uso do Solo a atribuição foi feita estabelecendo a relação de quão potencialmente contaminante é a atividade, destacando que a vegetação nativa recebeu o valor 1 e o Solo Exposto 5.

Por fim, para a integração dos dados foi utilizada a ferramenta Weigh Sum (ESRI,2010), que sobrepõe os atributos na forma de raster, multiplicando cada um deles pelo peso dado e por fim soma todos juntos. Neste caso foi atribuído o mesmo peso (1) para todos os atributos para que a análise não ficasse enviesada.

A partir da aplicação dos procedimentos metodológicos propostos os resultados são mostrados primeiramente em um panorama geral da fragilidade na bacia como um todo e posteriormente de forma mais específica em relação às unidades aquíferas identificadas por Lorandi et al. (2014).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carta de fragilidade ambiental do Rio clarinho foi proposta a partir da integração do meio físico com o uso do solo atual, visando analisar o grau de fragilidade das unidades aquíferas do local quanto à contaminação.

Primeiramente foi identificada a dinâmica de ocupação antrópica sobre o local, que demonstrou que a principal força motriz para as alterações ambientais ali existentes é proveniente do cultivo de cana-de-açúcar, que ocupa 56,6% do território. Outro fator preocupante identificado foi a grande quantidade de solos expostos (9,6% do total), já que este tipo de uso compreende todos os solos sem cobertura e áreas de erosão e campos e pastagens erodidos. Por outro lado, as áreas de

vegetação nativa recobrem quase 20% da área, sendo representadas por matas secundárias, vegetação ripária e reflorestamentos.

Os campos e pastagens foram analisados de forma conjunta por sua relativa proximidade de respostas espectrais, o que dificulta a diferenciação entre eles. Com isto, este tipo de uso é encontrado em 11,5% da bacia. A silvicultura, principalmente composta por eucaliptos, tem crescido em todo sudeste brasileiro, porém na área de estudo esta cultura está presente em 2,1%.

Por fim, os tipos de uso classificados como laranja e água (corpos hídricos) teve pouca representatividade, com menos de 1% cada. A tabela 3 demonstra especificamente as áreas recobertas por cada tipo de uso e as porcentagens que representam sobre o total da bacia.

**Tabela 3:** Áreas recobertas por cada tipo de uso

<b>Tipo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
<b>Água</b>	0,05	0,15
<b>Solo Exposto</b>	3,90	9,60
<b>Vegetação Nativa</b>	8,10	19,80
<b>Campo/Pastagem</b>	4,70	11,50
<b>Silvicultura</b>	0,90	2,10
<b>Cana-de-açúcar</b>	23,10	56,60
<b>Laranja</b>	0,10	0,25

**Fonte:** Autores, 2018

A análise da Carta de fragilidade Ambiental da bacia do rio Clarinho (Figura 3) permitiu identificar que a maior parte do seu território está em áreas de fragilidade forte ou muito forte, enquanto que apresentam maior proteção das unidades aquíferas (classes Muito Fraca e Fraca) tem pouca representatividade no total.

A tabela 4 mostra a relação entre as fragilidades e o total de área da bacia, evidenciando a necessidade de medidas que direcionem o uso do solo para atividades mais sustentáveis ou que respeitem a capacidade de suporte do ambiente quanto à fragilidade das unidades aquíferas ali presentes.

**Tabela 4:** Áreas recobertas por cada classe de fragilidade (km<sup>2</sup> e %)

<b>Fragilidade</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Muito Fraca</b>	1,02	3
<b>Fraca</b>	2,91	7
<b>Média</b>	9,25	23
<b>Forte</b>	14,70	36
<b>Muito Forte</b>	12,50	31

**Fonte:** Autores, 2018

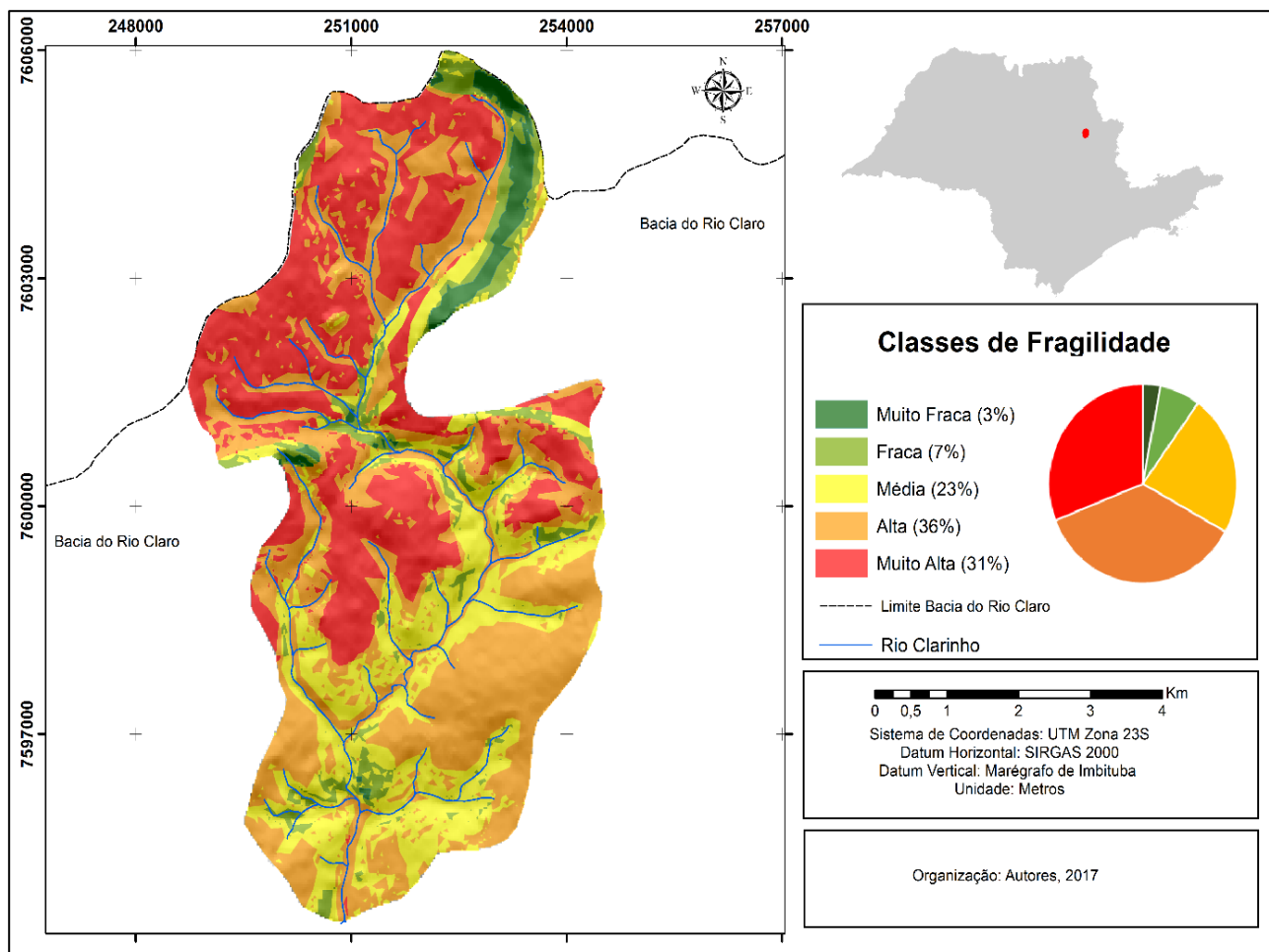
A classe de fragilidade “Muito Fraca” é caracterizada desta forma, pois possui uma combinação entre substrato rochoso e formação geológica de superfície compostos pela formação Intrusivas Básicas, altas declividades relacionadas às escarpas e uso do solo predominante de campos / pastagens e vegetação nativa, representando 3% do total da área. Com estes atributos, há um maior escoamento superficial e conseqüente menores taxas de percolação e infiltração que, aliado ao uso do solo, apresenta menor probabilidade de contaminação de unidades aquíferas.

Assim como a anterior, a classe “Fraca” (7% do total) está localizada predominantemente sobre o substrato rochoso e as formações geológicas de superfície da formação “Intrusivas Básicas”. Entretanto, as formas de relevo estão relacionadas aos platôs, encostas convexas e algumas encostas côncavas de baixas declividades. Destacam-se os usos de vegetação nativa, campo / pastagem e algumas áreas de cana-de-açúcar.

Já as áreas definidas como de “Média” fragilidade representam 23% da área e são formadas primordialmente por substrato rochoso e formação geológica de superfície derivados da formação Piramboia. As declividades nessas áreas variam de 12 a 20% e como uso do solo podem ser encontradas matas ripárias, cana-de-açúcar e citricultura.

Uma grande preocupação gerada pela análise é que a classe de fragilidade predominante na bacia é a considerada “Forte” (36% do total), proveniente da correlação espacial entre os tipos de substrato rochoso Botucatu e Piramboia, encostas convexas de baixas declividades (até 12%), formações geológicas de superfície que corroboram com o problema da contaminação (Santa Rita do Passa-Quatro, Piramboia e Botucatu) e tipos de uso inadequados para áreas frágeis, tais como Campos e Pastagens com processos erosivos, Cana-de-Açúcar e solo exposto.

A classe de fragilidade “Muito Forte” colabora com a preocupação com a bacia, já que sua área tem a expressiva quantia de 31 % do total, sendo a segunda maior classe identificada. Ocorre em áreas de declividades baixas e muito baixas (0 a 6%), encostas convexas, formações geológicas de superfície Botucatu e Santa Rita do Passa-Quatro, substrato rochoso predominante da formação Botucatu, contendo áreas de cana-de-açúcar e solo exposto. Esta classe representa a maior suscetibilidade à contaminação por atividades antrópicas, exigindo redobrada atenção dos gestores públicos.



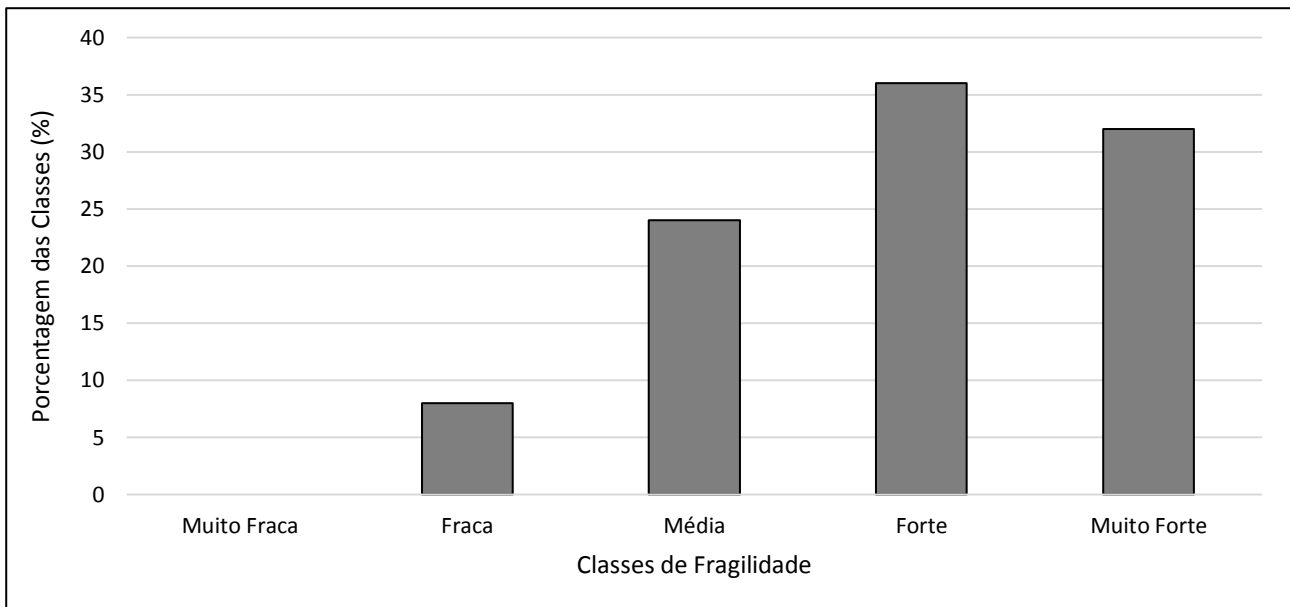
**Figura 3:** Carta de Fragilidade Ambiental do rio Clarinho

**Fonte:** Autores, 2018

### 3.1. Fragilidade quanto às unidades Aquíferas

#### Unidade Aluvionar

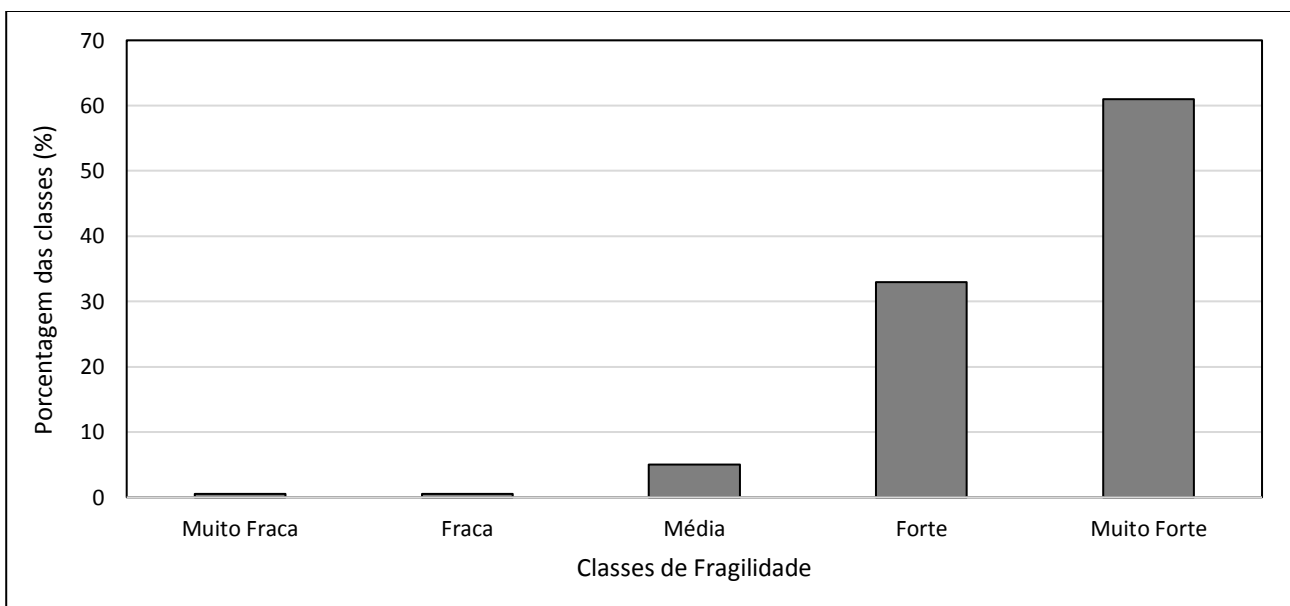
Sobre a Unidade Aquífera Aluvionar a fragilidade predominante é a considerada “Forte” (36 % da unidade), conforme demonstrado na figura 4. Como este é considerado um aquífero sedimentar de alta porosidade, relacionado a materiais arenosos, o fato de as classes mais diagnosticadas ali serem a “Forte” e “Muito Forte” eleva a preocupação com as águas subterrâneas do local. Levando em conta que o substrato rochoso e as formações geológicas de superfície favorecem naturalmente a contaminação da unidade, foi possível notar que mesmo a presença de matas nativas em grande parte da unidade é incapaz de diminuir sua fragilidade, relevando assim a necessidade de adoção de ações que limitem o uso do solo no local.



**Figura 4** – Porcentagem de cada classe na unidade aquífera Aluvionar  
**Fonte:** Autores, 2018

### Unidade Botucatu

Assim como a unidade Aluvionar, a Unidade Aquífera Botucatu apresenta fragilidade natural a contaminação devido à combinação entre seus atributos do meio físico, derivados principalmente de materiais arenosos de textura média. A fragilidade diagnosticada sobre esta unidade é primordialmente “Forte” e “Muito Forte”, totalizando 94 % da unidade inseridos nestas classes (figura 5).



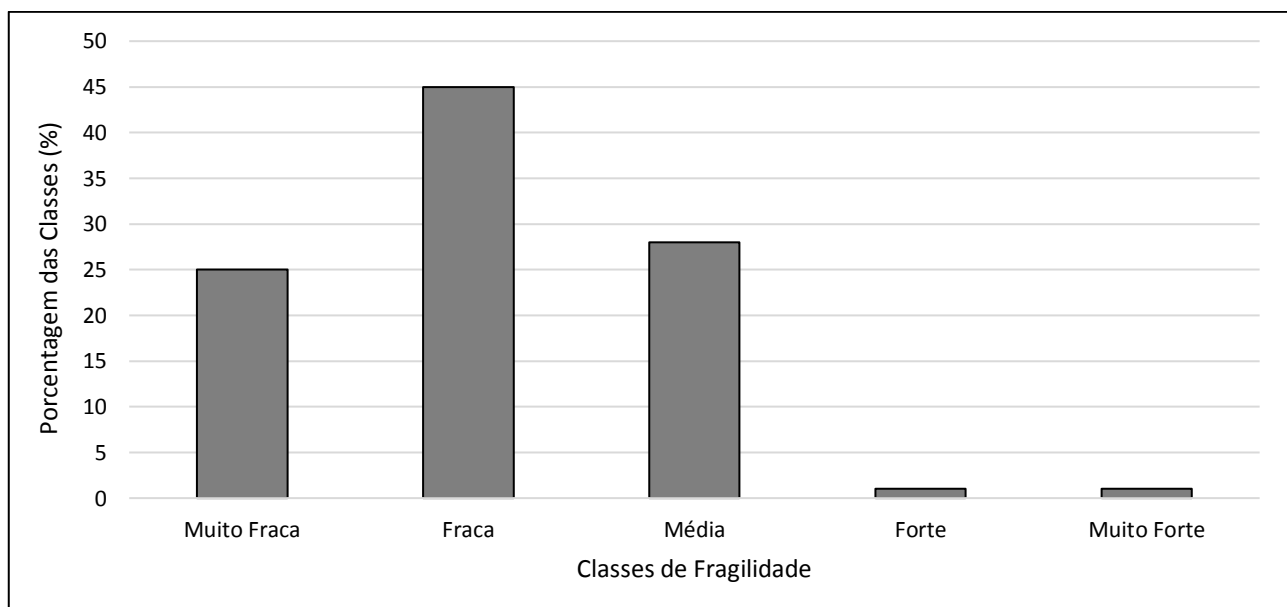
**Figura 5:** Porcentagem de cada classe na unidade aquífera Botucatu  
**Fonte:** Autores, 2018

Mesmo com um alto potencial natural de contaminação da unidade, seu uso do solo é bastante diversificado contendo campos/pastagens, matas nativas, cana-de-açúcar e solos expostos, evidenciando que não há nenhum tipo de planejamento no local voltado à conservação dos recursos hídricos subterrâneos.

Quanto à responsabilidade dos gestores públicos locais, é crucial que sejam implantados programas de reflorestamento para minimizar os impactos antrópicos sobre um ambiente naturalmente muito vulnerável. A continuidade de usos tais como as monoculturas de cana-de-açúcar que ali são encontradas promoverá o agravamento da situação, colocando reservatórios de água subterrânea em grande risco de contaminação por pesticidas, por exemplo.

### Unidade Serra Geral (Intrusivas Básicas)

Diferente das anteriores, a Unidade Aquífera Serra geral (Intrusivas Básicas) apresenta condicionantes naturais que não favorecem fortes fragilidades, principalmente por ser formada por rochas basálticas pouco porosas que dificultam o fluxo interno. Assim sendo, como mostra a figura 6, a grande maioria da unidade é recoberta pelas classes “Muito Fraca” (25%), Fraca (45 %) e “Média” (28%), o que sugere que haja um direcionamento das atividades antrópicas de maior impacto para estas áreas, já que são mais resistentes aos processos de contaminação. Entretanto, as altas declividades relacionadas a esta unidade dificultam a ocupação.



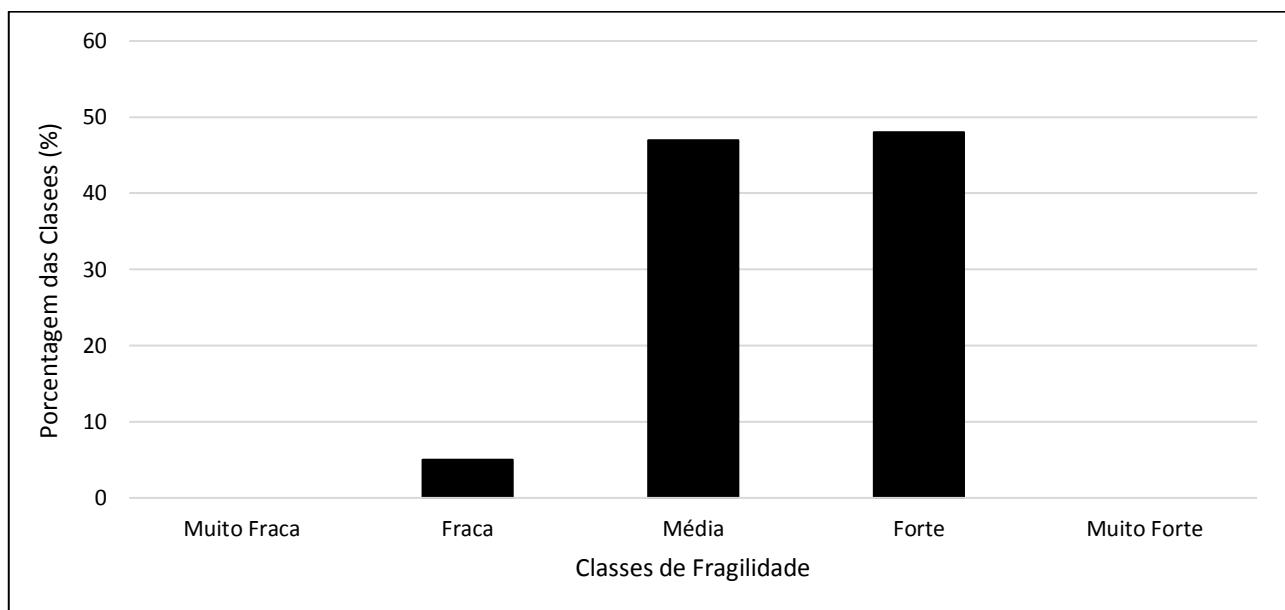
**Figura 6:** Porcentagem de cada classe na unidade aquífera Intrusivas Básicas

**Fonte:** Autores, 2018

## Unidade Piramboia

Como já apresentado anteriormente, a Unidade Aquífera Piramboia apesar de ser formada por material arenoso, contém significativas frações de argila em sua composição, o que assegura que esta unidade esteja menos propensa a ser contaminada em comparação com as unidades Botucatu, Aluvionar e Santa Rita do Passa Quatro. Mesmo assim, a análise do meio físico e dos usos do solo ali presentes indicou que em 95 % da sua área geográfica há a presença das classes de fragilidade “Média” e “Forte” (figura 7). Este fato está relacionado aos demais atributos do meio físico analisados, tais como a declividade e os landforms. Outro fator que corrobora para estas classes de fragilidade no local é a grande presença de cana-de-açúcar.

A monocultura da cana-de-açúcar é bem marcante sobre esta unidade, porém entende-se que uma cobertura mais adequada (matas nativas e campos naturais) auxiliaria no processo de diminuição de áreas de forte fragilidade na área.



**Figura 7:** Porcentagem de cada classe na unidade aquífera Piramboia

**Fonte:** Autores, 2018

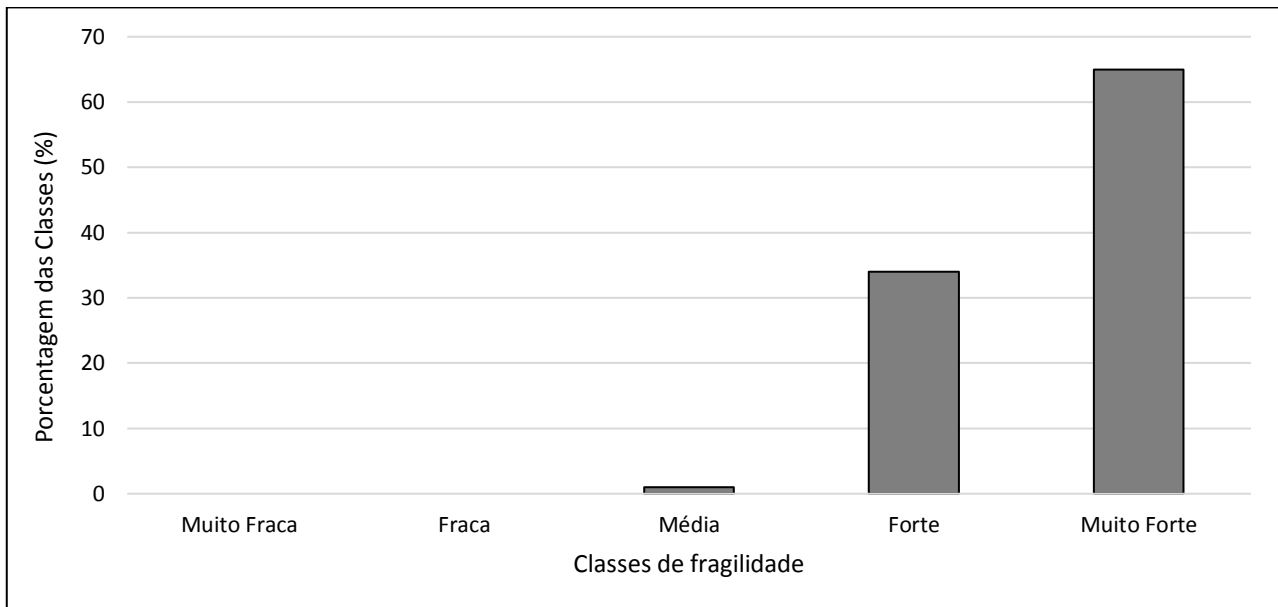
## Unidade Santa Rita do Passa Quatro

As características mais marcantes da Unidade Santa Rita do Passa Quatro são a porosidade, alta permeabilidade e a origem sedimentar, fazendo com que esta seja, de acordo com Lorandi et.al. (2014), bastante suscetível a receber cargas de contaminação provenientes de atividades antrópicas.

A fragilidade ambiental identificada na unidade (figura 8) comprova esta afirmação, já que 99% da área apresentam fragilidades “Forte” e “Muito Forte”. Mesmo com a presença de algumas áreas de vegetação nativa e silvicultura não foram identificadas áreas das classes “Muito Fraca” e

“Fraca”, demonstrando que o uso do solo tem pouca influência sobre a fragilidade dos aquíferos quanto à contaminação.

Apesar da relativa baixa influência do uso do solo, processos de reflorestamento e de limitação de atividades antrópicas podem minimizar a fragilidade ambiental natural da área, mitigando o processo de potencial contaminação do aquífero.



**Figura 8:** Porcentagem de cada classe na unidade aquífera Santa Rita do Passa Quatro  
**Fonte:** Autores, 2018

#### 4. CONCLUSÕES

A análise da relação entre os atributos do meio natural e das atividades antrópicas implantadas no local identificou que a bacia hidrográfica do rio Clarinho apresenta alta fragilidade ambiental quanto à contaminação das unidades aquíferas locais (90% do local encontra-se nas classes “Média”, “Forte” e “Muito Forte”), exigindo atenção redobrada ao serem propostas novas atividades antrópicas.

Entretanto, foi avaliado que o uso do solo tem pouca influência sobre a fragilidade dos aquíferos quanto a processos de contaminação na bacia, apontando que os atributos do meio físico, ou seja, a relação entre a pedogênese e a morfogênese na bacia são os responsáveis pela forte fragilidade, devida principalmente às suas formações geológicas de superfície e ao substrato rochoso compostos por materiais bastante arenosos que favorecem a infiltração, expondo as unidades aquíferas a potenciais processos de contaminação.

A partir destas informações, conclui-se que a bacia não é recomendada para expansões de atividades antrópicas, pois a própria dinâmica natural do local é desfavorável, fazendo com que suas unidades aquíferas estejam muito expostas a agentes contaminantes de diferentes fontes. Além disso,



as áreas consideradas de “Muito Fraca” e “Fraca” fragilidades que seriam as mais recomendadas para a implantação de atividades com maior potencial degradador estão relacionadas a regiões de alta declividade o que inviabiliza tais ações.

Um fator agravante é que o município de Santa Rita do Passa Quatro (onde a bacia está inserida) não propõe planos de conservação para os aquíferos em seu Plano Diretor municipal, tornando ainda mais necessário um plano de ações que contemple a limitação dos usos antrópicos na bacia, além de projetos de recomposição da vegetação nativa visando amenizar a fragilidade que o próprio meio físico natural acarreta.

A análise integrada que a metodologia utilizada propõe é bastante satisfatória pois permite avaliar integralmente as relações entre a morfogênese e pedogênese do território com as ações humanas implementadas e com baixo custo relativo, tornando-se uma importante ferramenta para gestores públicos

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de recursos financeiros e pela concessão de bolsa de doutorado, aportados aos Processos no. 2013/03699-5 e no 2016/19020-0.

## **REFERÊNCIAS**

CEREDA JUNIOR, A, RÖHM, S.A. Proposal and analysis of environmental fragility model using multicriteria analysis and fuzzy logic for integrated landscape mapping. **Journal of Urban and Environmental Engineering (UFPB)**, v.8, p.28-37, 2014.

DUARTE, L; GUERNER DIAS, J; MARQUES, J; TEODORO, A.C; GONÇALVES, J.A & MARTINS CARVALHO, J. Avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea à poluição através do método DRASTIC - uma aplicação SIG open source. **Comunicações Geológicas**. v. 101, Especial II, p.677-680, 2014.

ELBEIH; S.F. An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. **Ain Shams Engineering Journal**. v.6, p.1–15, 2015.

GUERRERO, J. V. R. **Zoneamento geoambiental analítico da bacia do Rio Clarinho a partir da técnica de avaliação de terreno, na escala 1: 50.000**. 2014. 94p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2014

GUERRERO, J. V. R., LOLLO, J. A; LORANDI, R. CARTOGRAFIA GEOAMBIENTAL COMO BASE PARA PLANEJAMENTO TERRITORIAL NA BACIA DO RIO CLARINHO, SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.68(2), p.313-326. 2016.

HIRATA, R.; VIVIANI-LIMA, J.B; HIRATA, A. 2009. A água como recurso. In: TEIXIERA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Companhia Nacional. p. 448-485.

HORNERO, J; MANZANO, M; ORTEGA; CUSTODIO, E. Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcaozo Aquifer System (SE Spain). **Science of the Total Environment**. v. 568, p.415–432, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cartas topográficas**. Folha Topográfica de Santa Rita do Passa-Quatro (SF-23-V-C-V-1. C Escala 1:50.000, 1971. ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS® 10.0 Tutorial. 2010. 13 vol.

INSTITUTO GEOLÓGICO (IG). **Mapa Geológico** – Folha Santa Rita do Passa-Quatro (SF-23-VC-V-1). São Paulo, 1981. Escala 1:50.000.

IRITANI, M. A., & EZAKI, S. 2008. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. In: **Cadernos de Educação Ambiental**. São Paulo (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente.

LORANDI, R.; LOLLO, J.A.; GUERRERO, J.V.R. Carta de unidades aquíferas aplicada ao zoneamento (Geo) ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Claro In: 14 CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, Covilhã. **Anais...** UBI - Serviços Gráficos, 2014. v.1. p.1 -10

MENDONÇA, J. L. G. & GUTIERRE, T. M. C. 1998. Os aquíferos Botucatu e Piramboia no Estado de São Paulo: novos mapas de isóbatas do topo, espessura e nível d'água. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais...** v.1. p.1-10.

MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G; FILHO, R. A. Técnicas de Suporte à Decisão para Modelagem Geográfica por Álgebra de Mapas. **Relatório Técnico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**: 03-40, 2001.

OIKONOMIDIS, D; DIMOGIANNI, S; KAZAKIS, N; VOUDOURIS, K. A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. **Journal of Hydrology**. v. 525, p.197–208., 2015.

RAHMATI, O; POURGHASEMI, H.R; MELESSE, A.M. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. **Catena**. v.137, p.360–372, 2017.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. n.8, p.63-74. 1994.

SENER, S; SENER, E; DAVRAZ, A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). **Science of the Total Environment** n.584–585, p.131–144, 2017.

TANAJURA, D.S; LEITE, C.B.B.L. QUANTIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA JACARÉ-PEPIRA/SP. **Águas Subterrâneas**. v. 30(3), p.306-325, 2016.

TAYLOR, G. Ground water and climate change. **Nature Climate Change**. Vol.3 p. 322-329, 2012.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. FIBGE: Rio de Janeiro, 1977.

Trabalho enviado em 09/01/2018

Trabalho aceito em 16/03/2018