

## Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca a Poluição de Aqüíferos Cársticos em Ambientes Tropicais Através da Utilização do Programa SINTACS<sup>1</sup>

Soraya AYUB 1; Franco CUCCHI 2; Paolo FORTI 3; Luca ZINI 2

1 - Via Roma, 11 23827 Lierna (LC) Italia, [akakor@tin.it](mailto:akakor@tin.it)

2 - Via E.Weiss, 2 34127 Trieste, Italia, [cucchi@univ.trieste.it](mailto:cucchi@univ.trieste.it) , [zini@univ.trieste.it](mailto:zini@univ.trieste.it)

3 - Via Zamboni, 6740127 Bologna Italia, [forti@geomin.unibo.it](mailto:forti@geomin.unibo.it)

### Abstract

#### ***The evaluation of the pollution intrinsic vulnerability of karst aquifers in a tropical environment using the point count system SINTACS***

In the last 15 years the U.O. 4.7 and 4.9 of the National Group for the Defence against the Hydrogeological Catastrophes evaluated the pollution vulnerability of several karst aquifers in the temperate zone by using the SINTACS point count system.

The present paper is the first attempt to apply the same method to important karst springs in a tropical area, in São Paulo State, Brazil. Their catchment areas extend more than 24,2 km<sup>2</sup> and are mainly located inside the High Ribeira State Turistical Park (PETAR) which is characterised by the Atlantic forest with a tropical humid climate without arid periods. The karst aquifers consist of limestones and dolostones surrounded and interbedded with metamorphic siltstones and sandstones. The karst systems are well developed, with a flood flow rate of about 3.6 cm/s (April 1997) thus corresponding from medium to high velocity systems (SMART e HODGE 1979).

In order to obtain the vulnerability map for the aquifer feeding the karst spring it has been necessary to prepare several digital thematic maps (geological, geomorphological, hydrogeological, speleological, ecc) which represent the base layers for the SINTACS evaluation of a specific GIS for the intrinsic and integrated vulnerability of the whole studied area.

In the present paper the used criteria for defining the values of the different parameters to be used in the SINTACS model are shortly discussed.

### Resumo

Nos últimos 15 anos as unidades operativas 4.7 e 4.9 do GNDCI - Grupo Nacional pela Defesa das Catástrofes Hidrogeológicas do CNR (Conselho Nacional de Pesquisa), Itália, avaliou a vulnerabilidade em que se encontram os aqüíferos cársticos em regiões de clima temperado usando o programa SINTACS.

Este artigo tem como objetivo mostrar a aplicação do método em importantes ressurgências carsticas numa zona de clima tropical, no Estado de São Paulo, Brasil. A área de estudo apresenta uma superfície de 24,2 km<sup>2</sup> que em parte está inserida em terras pertencentes ao PETAR – Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira. A área de estudo apresenta clima tropical úmido, vegetação de mata Atlântica. Os aqüíferos cársticos apresentam metacalcários e metadolomitos alternados com filitos e metarenitos. Os sistemas cársticos são bem desenvolvidos com velocidade média em torno de 3,6 cm/s (abril 1997) que corresponde a média dos sistemas classificados por SMART and HODGE (1979) como de alta velocidade.

Para se obter o mapa de vulnerabilidade intrínseca de um aqüífero devem ser preparados antes outros mapas temáticos como geológico, geomorfológico, hidrogeológico, espeleológico, etc) que representam os layers básicos para o programa SINTACS ou mesmo um GIS onde tem-se como resultado final a carta de vulnerabilidade intrínseca ou integrada da área como um todo.

No presente artigo o critério utilizado para definir os valores de diferentes parâmetros para serem usados pelo modelo SINTACS são discutidos brevemente.

<sup>1</sup> Publicação n. 2238 do Grupo Nacional pela Defesa das Catástrofes Hidrogeológicas, do CNR, U.O. 4.9 (Departamento de Ciências da Terra e Geológico Ambientais, Universidade de Bologna), Responsável Prof. Paolo Forti

## Introdução

A área de estudo compreende os sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, localizados no município de Iporanga, a su-sudoeste do Estado de São Paulo, na região do alto curso do rio Ribeira, no distrito espeleológico do Vale do Ribeira (KARMANN e SANCHEZ 1986 e KARMANN 1994), Brasil.

Geomorfologicamente, a área a ser estudada encontra-se sobre o flanco sudoeste da Serra de Paranapiacaba, de relevo montanhoso, com amplitudes topográficas de até 700 metros. Esta região constitui uma zona de transição entre o Planalto Atlântico e a Baixada Costeira chamada de Serrania do Ribeira (IPT 1981a). Na Serrania do Ribeira existem os altiplanos interiores e as áreas carbonáticas estudadas são situadas em um destes altiplanos, chamado Planalto do Lajeado, cortado transversalmente pelo rio Betari, que representa o nível de base.

O clima do Vale do Ribeira, de um modo geral é classificado como tropical úmido (GUTJAHN 1993), onde não são observados períodos de seca total. O índice de pluviosidade médio varia entre 1500 e 1850 mm, sendo que a média de 1974 a 1993 foi de 1604 mm (KARMANN *op. cit.*). A cobertura vegetal densa é típica de mata Atlântica.

## Descrição dos Sistemas Cársticos Estudados

Os rios Roncador, Furnas e Córrego Grande, que apresentam águas que correspondem àquelas das ressurgências dos sistemas cársticos estudados (Pérolas-Santana, Grilo e Zezo respectivamente) representam tributários da margem direita do Rio Betari, que por sua vez é afluente da margem esquerda do Rio Ribeira.

Os sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo são do tipo misto onde devido ao rebaixamento topográfico da superfície carbonática em relação as rochas não carbonáticas ao redor, ocorre importante injeção d'água alogênica em relação a recarga autogênica dos aquíferos cársticos (KARMANN *op. cit.*).

Os sistemas estudados apresentam as seguintes características:

**Pérolas-Santana:** apresenta o sumidouro principal no Córrego Mendes, a 150 metros da entrada principal da Caverna de Pérolas e a ressurgência principal se encontra na entrada da caverna de Santana. Além de Santana e Pérolas faz parte do sistema a caverna Tobias.

**Grilo:** apresenta sumidouro principal no córrego Sumido e é constituído da caverna Grilo, cujo o seu rio subterrâneo é principal afluente do rio Furnas.

**Zezo:** o seu principal sumidouro localiza-se no Córrego Consteca e apresenta a sua ressurgência principal na caverna Zezo.

## Geologia Regional e Local da Área de Estudo

A área estudada é inserida em um complexo de rochas supracrustais vulcano-sedimentares, de grau metamórfico baixo a médio, denominado genericamente de Grupo Açungui (CAMPANHA 1991). Os terrenos cársticos que foram estudados pertencem às Formações Bairro da Serra e Betari, que fazem parte do Subgrupo Lajeado, que é constituído de uma seqüência metassedimentar de grau metamórfico baixo (zona da clorita), nas proximidades do Gabro de Apiaí. A Formação Betari é a unidade basal do Subgrupo Lajeado e é formada de metarenitos, metarenitos arcosianos e arenitos heterogêneos. A Formação Bairro da Serra apresenta unidades formadas de metacalcários, sendo em geral calcíticos e localmente dolomíticos, com intercalações de filitos sericíticos e siltes carbonáticos.

## Elaboração do Mapa de Vulnerabilidade Integrada Através do Programa SINTACS

Para a elaboração do mapa de vulnerabilidade integrada foi usado um programa de cálculo específico para avaliação da vulnerabilidade intrínseca (CIVITA 2000; CIVITA *et al.* 1991) realizado pelo GNDCI/CNR, Itália. O programa é baseado num sistema paramétrico de pontuação e pesos, que foi especialmente adaptado ao ambiente cárstico e experimentado com sucesso em algumas das principais áreas cársticas italianas.

Pela primeira vez foi utilizado em um país caracterizado como clima tropical.

O acrônimo do programa deriva das iniciais dos sete parâmetros principais (escritos em italiano) que são considerados para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca de uma área de estudo: (1) *soggiacenza*: distância vertical do nível do freático até a superfície externa do sistema em questão; (2) *infiltrazione efficace*: infiltração que realmente penetra no solo; (3) *non saturo*: compreende a zona entre a superfície do freático e a base da camada de solo antes da superfície externa. Esta zona insaturada é a segunda linha de defesa do aquífero em questão pois a primeira é o solo; (4) *copertura*: tipo de solo que cobre a área cárstica; (5) *acquifero*: constitui-se das características hidrogeológicas do aquífero; (6) *conducibilità idraulica*: condutibilidade hidráulica do aquífero; (7) *superficie* (acclività): declividade do terreno.

O programa requer que a área de estudo seja dividida em uma malha de quadrados elementares cujas dimensões devam ser as menores possíveis permitindo assim a caracterização da heterogeneidade do aquífero cárstico. Para a área estudada (24,2 km<sup>2</sup>), foi realizado uma base cartográfica na escala de 1:25.000. A malha foi elaborada em quadrados com lados que correspondem a 200 metros. Para cada quadrado é definida uma série de características geológicas, hidrogeológicas, pedológicas, hidrodinâmicas, etc, que são combinadas entre si para a obtenção dos parâmetros utilizados no programa SINTACS. O programa após haver calculado para cada um dos parâmetros um peso correspondente segundo uma avaliação da específica da situação hidrológica ou de impacto calcula a vulnerabilidade intrínseca. O valor numérico, assim obtido para cada quadrado, é transformado em porcentagem e subdividido em 6 classes de vulnerabilidade (extremamente elevada, muito elevada, alta, média, baixa, muito baixa ou nula) que vêm representadas num mapa com diferentes cores. O mapa de vulnerabilidade integrada é deste modo, obtido através do mapa de vulnerabilidade intrínseca onde foram calculados todos os produtores ou redutores em potencial de contaminação de um aquífero cárstico.

Este mapa é fundamental porque fornece uma base indispensável para um correto planejamento do território e também porque é diferente dos mapas de Hidrogeologia, pois é facilmente compreensível por aqueles que não são da área, facilitando o serviço das autoridades locais, que devem garantir a manutenção da qualidade, das águas que são contidas em um determinado aquífero cárstico.

## Parâmetros SINTACS

### Espessura da Zona Vadosa (Soggiacenza)

Na área de estudo foi atribuído peso 1 para a região dos filitos, granitos e a do dique de diabásio. Para a zona do córrego Mendes peso 10 significando que a espessura da zona vadosa é muito baixa. Os sistemas Grilo e Zezo recebem peso 8, os metarenitos, a área da caverna de Pérolas peso 2 e a área que compreende as cavernas de Tobias e Santana recebem o peso de 1. Atribui-se um peso de 3 para as áreas que compreendem as cavernas Grilo e Zezo.

### Infiltração

A região estudada apresenta uma notável quantidade de precipitação anual cuja média é de 1604 mm (última série histórica). Considerando-se uma evapotranspiração elevada (acima de 70%), aos litotipos presentes e ao índice de fraturamento e carstissismo considera-se uma infiltração média para a área onde encontram-se os sumidouros e uma infiltração baixa para as outras áreas.

### Efeito de Autodepuração da Zona Insaturada

A zona insaturada é a parte do subsolo que se encontra entre a base do solo e a zona saturada (zona de oscilação) do aquífero. Esta zona é sujeita a oscilações verticais da água subterrânea, e limitada na sua parte inferior pela superfície piezométrica.

Foi atribuído peso 10 aos sistemas cársticos e drenagens, ou seja, não existe nenhuma depuração por parte das rochas ali presentes. Verifica-se ainda que o efeito de depuração aumenta gradativamente conforme se afasta dos sistemas cársticos e drenagens estabelecendo peso 9 e 8 para estas zonas. As áreas cobertas por filitos ganham peso 1 (o mesmo ocorrendo com os granitos) pois são quase impermeáveis e o pouco de água que penetra o faz de modo muito lento. Já para as áreas cobertas com metarenitos o peso atribuído é 4 devido a uma razoável permeabilidade das mesmas.

## Tipologia de Cobertura de Solos

Os solos presentes na área de estudo apresentam geralmente espessura elevada, ou seja, acima de 1 metro, com exceção das áreas onde se localizam os sistemas cársticos e a zona do dique de diabásio. Nestes locais se podem observar afloramentos de rocha onde quase não existe solo. A permeabilidade é baixa nas áreas onde encontramos filito mas é elevada nas áreas onde se apresentam outras rochas atingindo valores máximos na zona dos sistemas cársticos.

As classes de solo são representadas pelos solos franco argiloso e franco limoso desenvolvidos a partir das rochas carbonáticas e filíticas respectivamente. O solo franco arenoso corresponde as rochas metareníticas da Serra da Boa Vista que se encontram a noroeste da área. Onde encontramos os sistemas cársticos com suas respectivas drenagens verificamos que existe pouco ou quase nenhuma cobertura de solo e sim rochas aflorantes.

## Aquífero

O aquífero estudado é caracterizado por apresentar uma permeabilidade muito alta devido ao alto carsticismo e fraturamento das rochas carbonáticas. Os sistemas apresentam velocidade alta para os fluxos d'água sobretudo porque se tratam de sistemas de condutos o que se pode concluir que são muito vulneráveis a altas concentrações de contaminantes hidroveiculáveis, determinados somente pela diluição.

## Condutibilidade Hidráulica

Nos sistemas cársticos estudados foram efetuados testes com traçadores fluorescentes (rhodamina-WT) por AYUB (1998) com o objetivo de determinar as rotas de fluxo de tais sistemas como também a velocidade e a vazão dos mesmos. Foram detectados neste trabalho perdas de água dos Sistema Zezo para o Sistema Grilo e também deste último para o Sistema Pérolas-Santana o que se pode concluir que se trata de um sistema cárstico único. Para o sistema Pérolas-Santana os testes com traçador deram resultados em torno de 3,6 cm/s. Portanto, atribui-se pesos de elevada condutibilidade para a áreas dos sistemas cársticos e áreas laterais a estes e pesos baixos para outros litotipos.

## Declividade da Superfície Topográfica

A declividade da área de estudo é muito variada havendo desde trechos de planície até trechos de declividade muito elevada. Para o cálculo da pontuação para o parâmetro declividade foi utilizada uma base topográfica 1:25.000, que permitiu de determinar 5 classes de pendência, expressas em percentual: uma primeira faixa entre 1 e 15 %, uma entre 15 e 19%, uma entre 20 e 24%, uma entre 25 e 29% e finalmente superior a 30%.

## Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca e Integrata

O mapa de vulnerabilidade intrínseca é obtido através da sobreposição das 7 cartas dos parâmetros SINTACS brevemente descritos. A este foi aplicado o peso correspondente a área de rocha fraturada, visto que prevalece este tipo de permeabilidade nas rochas carbonáticas presentes no aquífero.

O mapa de vulnerabilidade intrínseca assim obtido evidencia, na maior parte da área de recarga do aquífero cárstico, a baixa e a baixíssima vulnerabilidade (acumulativamente além de 50%). Isto ocorre devido ao fato que a área de estudo apresenta rochas praticamente impermeáveis (não carbonáticas) e os metacalcários aflorantes consentem apenas uma pequena infiltração por causa dos espessos solos quase impermeáveis.

As áreas de elevada e elevadíssima vulnerabilidade, respectivamente 5% e menos de 3% do total, correspondem a sumidouros e zonas de percolação direta nos rios subterrâneos principais. Portanto, mais da metade da área cárstica é caracterizada por haver uma vulnerabilidade média (11%) e uma vulnerabilidade alta (21%).

O mapa de vulnerabilidade integrata, que se obtém através da sobreposição dos pontos de perigo real e potencial de contaminação ao mapa de vulnerabilidade intrínseca, evidencia os poucos centros de perigo a montante das ressurgentes, que não podem influenciar praticamente na qualidade das águas. Portanto, no

momento, pode-se considerar que o risco de contaminação do Sistema cárstico Pérolas-Santana é muito baixo.

### Conclusões

O programa SINTACS tem-se demonstrado válido para a caracterização da vulnerabilidade intrínseca também em países de ambiente tropical.

Naquilo que concerne a qualidade das águas armazenadas no sistema cárstico Pérolas-Santana o risco de contaminação resulta ser atualmente mínimo mesmo porque a existência de um parque natural, que abrange boa parte do sistema (o restante está contido em área de APA – Área de Proteção Ambiental) deve ser uma garantia suficiente para a proteção de suas águas.

Entretanto, o notável crescimento da atividade turística nos últimos anos poderá criar condições de contaminação para as águas. Esta situação deve ser bem conhecida das autoridades do PETAR, que devem, de qualquer modo, evitar uma excessiva frequentação e/ou comportamentos não eco-compatíveis na região, cuja vulnerabilidade pode ser controlada através da utilização de programas como o SINTACS, ferramenta importante para a preservação do meio ambiente.

### Agradecimentos

Agradecemos a toda a equipe do PETAR pela colaboração à pesquisa realizada, ao Instituto Florestal por possibilitar a realização deste trabalho, ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Brasileiro pela bolsa de estudos a doutoranda Soraya Ayub. Um agradecimento especial a Jurandir Aguiar dos Santos, Valdecir e José A. B. Scaleante pela colaboração nos trabalhos de campo.

### Referências Bibliográficas

- AYUB, S. 1998. Aplicação do corante traçador fluorescente rodamina-wt no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, Município de Iporanga, Estado de São Paulo, São Paulo, 106p. (Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências USP).
- CAMPANHA, G. A. C. (1991). Tectônica proterozóica na alto e médio vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná. São Paulo, 296p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/Universidade São Paulo).
- CIVITA M., DE MAIO M., 2000. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5. Pitagora Editrice, Bologna, 228 pp.
- CIVITA M., FORTI P., MARINI P., MECCHERI M., MICHELI L., PICCINI L., PRANZINI G. 1991. Carta della vulnerabilità all'inquinamento delle Alpi Apuane 1:25.000, Selca, Firenze.
- GUTJAHR, M. R. 1993 Critérios relacionados a compartimentação climática de bacias hidrográficas: a bacia do Rio Ribeira de Iguape. São Paulo, 90p. (Dissertação de mestrado – Departamento de Geografia/FFLCH/Universidade de São Paulo).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO 1981a. Mapa geológico do Estado da São Paulo, escala 1:500.000. São Paulo: IPT/PRÓ-MINÉRIO.
- KARMANN, I. 1994. Evolução e Dinâmica atual do Sistema Cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo. São Paulo, 228p. (Tese de Doutorado - Instituto de Geociências/USP).
- KARMANN, I. e SANCHEZ, L. E. 1986. Speleological Provinces in Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9, Barcelona, 1986. Barcelona, IUS. v.1, p.151-153.
- SMART, P. L. and HODGE, P. G. 1979 A pulse wave test at chartrehouse, Journal Wessex Cave Club, n.15, v.176, p.132-136.

Espessuras da zona vadosa	Infiltração	Efeito de autodepuração da zona insaturada	Tipologia de cobertura	Tipo de aquífero	Condutibilidade e hidráulica	Declividade (%)
Córrego Mendes (10)	Sumidouros (5)	Sistemas cársticos e drenagens superficiais (10)	Sutil o ausente (10)	Sistemas cársticos e drenagens superficiais (10)	Sistemas cársticos e drenagens superficiais (10)	<15 (5)
Sistemas Grilo e Zezo (8)	Metarenito, granitos, filitos (2)	Áreas laterais aos sistemas cársticos e drenagens superficiais (9-8)	Franco arenoso (6)	Áreas laterais aos sistemas (8-9)	Áreas laterais aos sistemas (8-9)	15-19 (4)
Metarenitos (7)	Dique de diabásio (2)	Metarenitos (4)	Franco limoso (4)	Metarenitos (4)	Metarenitos e granitos (2)	20-24 (3)
Cavernas Grilo e Zezo (3)	Ressurgências e Cavernas (2)	Filitos, granitos e dique de diabásio (1)	Franco argiloso (3)	Filitos, granitos e dique de diabásio (1)	Filitos e dique de diabásio (1)	25-29 (2)
Caverna Pérolas (2)						> 30 (1)
Cavernas Tobias e Santana (1)						
Filitos, granitos e dique de diabásio (1)						

*Tabela 1 – Classes dos diversos parâmetros de SINTACS determinadas na área dos sistemas cársticos de Pérolas-Santana, Grilo e Zezo e relativas pontuações*