



ESPELEO-TEMA

REVISTA BRASILEIRA DEDICADA AO ESTUDO DE CAVERNAS E CARSTE

ISSN 0102-4701 (impresso)
ISSN 2177-1227 (on-line)

Volume 29 Número 2
Ano 2019



Artigos Originais

Non-linear response of cave temperature caused by tourist visitation in the cave of Santana (PETAR – Brazil): implications for carrying capacity of show caves
Heros Augusto Santos Lobo

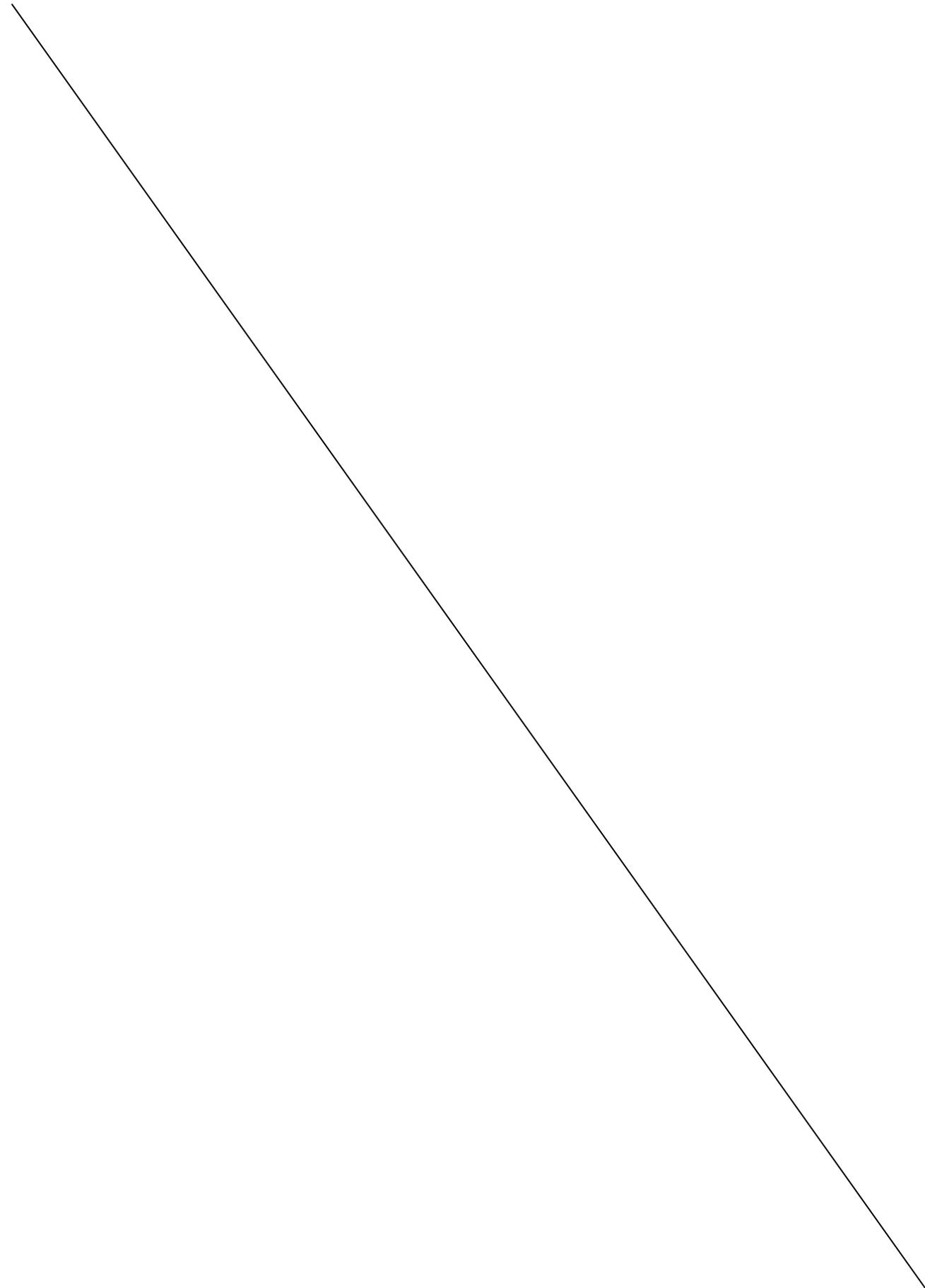
Geoespeleologia da Gruta dos Rodrigues, Iporanga (SP)
Bruno Cirilo Consentino, William Sallun Filho & Bruno Daniel Lenhare

Land use analysis in karst regions of southeastern São Paulo State
T Bruno Daniel Lenhare, William Sallun Filho & César Augusto Moreira

Estudos preliminares de caracterização litoestrutural e geomecânica em cavidades ferríferas, Carajás-PA
Chrystophe Ronaib, Allan Douglas, Vanese Vieira, Marcelo Barbosa, Rafael Guimarães & Iuri Brandi

Sociedade Brasileira de Espeleologia

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



EXPEDIENTE



Sociedade Brasileira de Espeleologia
(Brazilian Speleological Society)

Endereço (Address)

Caixa Postal 7031 – Parque Taquaral
CEP: 13076-970 – Campinas SP – Brasil

Contatos (Contacts)

+55 (19) 3296-5421
espeleo-tema@cavernas.org.br

Gestão 2019-2021 (Management Board 2019-2021)

Diretoria (Direction)

Presidente: Allan Silas Calux
Vice-presidente: Elvis Pereira Barbosa
Tesoureiro: Paulo Henrique Rosado Arenas
1º Secretário: Gisele Cristina Sessego
2º Secretário: Rafael da Fonseca Ferreira

Conselho Fiscal (Supervisory Board)

Edvard Dias Magalhães
Mariana Barbosa Timo
Delci Kimie Ishida
Rafael Henrique Grudka Barroso – suplente (*alternate*)
Rodrigo Severo – suplente (*alternate*)

ESPELEO-TEMA

Editores-Chefes (*Chief Editor*)

Dra. Maria Elina Bichuette
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Dr. William Sallun Filho
Instituto Geológico – IG/SIMA-SP

Editor Assistente (*Assistant Editor*)

Esp. Marcelo Augusto Rasteiro
Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE

Conselho Editorial (*Editorial Board*)

Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/Minas

Dr. Heros Augusto Santos Lobo
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Conselho Consultivo (*Consulting Board*)

Dr. Astolfo Gomes de Mello Araujo
Universidade de São Paulo – USP

Msc. Elvis Pereira Barbosa
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Dra. Eleonora Trajano
Universidade de São Paulo – USP
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Dr. Emerson Galvani
Universidade de São Paulo – USP

Dra. Emília Mariko Kashimoto
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Ezio Rubbioli
Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – GBPE

Dr. Fernando Morais
Universidade Federal do Tocantins - UFT

Dr. Francisco Sekiguchi de Carvalho e Buchmann
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Dr. Gilson Burigo Guimarães
Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG

Dr. Gilson Rodolfo Martins
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Dr. Luis Beethoven Piló
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Dr. Luis Enrique Sánchez
Universidade de São Paulo – USP

Dr. Luiz Afonso Vaz de Figueiredo
Fundação Santo André – FSA

Dr. Maurício de A. Marinho
M&P Cons. Est. Amb.

MSc. Mylène Luíza Cunha Berbert-Born
Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM

Dr. Nicolás Misailidis Stríkis
Universidade Federal Fluminense - UFF

Dr. Paulo César Boggiani
Universidade de São Paulo – USP

Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Apoio à Tradução (*Translation support*)

Dra. Linda Gentry El-Dash
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

SUMÁRIO (CONTENTS)

Editorial	150
------------------	------------

ARTIGOS ORIGINAIS

Non-linear response of cave temperature caused by tourist visitation in the cave of Santana (PETAR – Brazil): implications for carrying capacity of show caves <i>Variações não lineares da temperatura ambiente causadas pela visitação turística na caverna de Santana (PETAR-SP): implicações para a capacidade de carga espeleoturística</i> Heros Augusto Santos Lobo	151
---	------------

Geoespeleologia da Gruta dos Rodrigues, Iporanga (SP) <i>Geospeleology of the Rodrigues Cave, Iporanga (São Paulo State, Brazil)</i> Bruno Cirilo Consentino, William Sallun Filho & Bruno Daniel Lenhare	165
--	------------

Land use analysis in karst regions of southeastern São Paulo State <i>Análise de uso e ocupação em áreas cársticas do sudeste do Estado de São Paulo</i> Bruno Daniel Lenhare, William Sallun Filho & César Augusto Moreira	181
--	------------

Estudos preliminares de caracterização litoestrutural e geomecânica em cavidades ferríferas, Carajás-PA <i>Lithostructural and geomechanical preliminary studies in iron caves, Carajás-PA</i> Chrystophe Ronaib, Allan Douglas, Vanese Vieira, Marcelo Barbosa, Rafael Guimarães & Iuri Brandi	195
--	------------

EDITORIAL

É com satisfação que trazemos ao conhecimento da sociedade um segundo número do ano de 2019 da Revista Espeleo-Tema com quatro trabalhos de temas relacionados a cavernas no território brasileiro.

Este é um volume especial, que marca o cinquentenário da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE). Durante seus 50 anos de existência foram inúmeras contribuições da SBE para espeleologia nacional. Uma delas é a revista Espeleo-Tema, desde 1970 divulgando a espeleologia no Brasil, e que se tornou uma revista científica a partir da década de 80. É um periódico gratuito que nestes 49 anos de existência já publicou mais de uma centena de artigos científicos, além de notas técnicas, artigos de opinião, resumos e notícias sobre cavernas e carste.

Nesta edição o primeiro artigo é sobre espeleoclima, monitoramento e turismo na Caverna Santana, em Iporanga (SP). O artigo ressalta a importância do tempo de permanência dos visitantes grupos em setores da caverna como fator crítico na visitação espeleoturística.

O segundo artigo, apresenta a morfologia, geologia e espeleogênese da Gruta dos Rodrigues, em Iporanga (SP), nos arredores do Parque Estadual Intervales. Este artigo traz a descrição da ardealita, mineral nunca descrito no Brasil.

O terceiro artigo também aborda terrenos cársticos do Parque Estadual Intervales e arredores, área de intensa expansão humana. O artigo foca o mapeamento dos usos da terra nesta região e sua evolução temporal, por meio do uso de sensoriamento remoto.

O quarto e último artigo trata de estudos geológicos e geomecânicos em cavidades ferríferas em Carajás (PA). O estudo apresentado contribui ao conhecimento geoespeleológico exigido pela legislação no que diz respeito à estabilidade estrutural das cavidades durante as atividades minerárias.

Agradecemos à colaboração dos autores e revisores, sempre dispostos a contribuir com a revista. E convidamos a todos a publicação de artigos inéditos, sempre divulgando e promovendo o fortalecimento da ciência espeleológica nacional

Parabéns a SBE e boa leitura!

Maria Elina Bichuette
William Sallun Filho
Editores-Chefe

Marcelo Augusto Rasteiro
Editor-Assistente



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

NON-LINEAR RESPONSE OF CAVE TEMPERATURE CAUSED BY TOURIST VISITATION IN THE CAVE OF SANTANA (PETAR – BRAZIL): IMPLICATIONS FOR CARRYING CAPACITY OF SHOW CAVES

VARIAÇÕES NÃO LINEARES DA TEMPERATURA AMBIENTE CAUSADAS PELA VISITAÇÃO TURÍSTICA NA CAVERNA DE SANTANA (PETAR-SP): IMPLICAÇÕES PARA A CAPACIDADE DE CARGA ESPELEOTURÍSTICA

Heros Augusto Santos Lobo

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Sorocaba SP.

Contatos: heroslobo@ufscar.br.

Abstract

The monitoring of the atmosphere of show caves is frequently used to provide support for the evaluation of changes evoked by the visitation by tourists. Such measurements are generally taken at specific points along the routes established for visitation and reflect the effect of the time spent by visitors. A program for monitoring the atmosphere of the cave of Santana was undertaken for this purpose, thus providing support for the evaluation of the carrying capacity established for tourism in that cave. The studies were conducted during regular visitation of the cave, so that the impacts of this visitation on the air temperature at two specific points could be evaluated. The increase was found to be up to 1.1°C in Cristo room and up to 1.3°C in Encontro room. This article shows, however, that the impact of the number of visitors is not linear, nor is that of the total number of visitors during a day, although the length of time spent at specific points in the cave was found to be critical. The number of visits per day to be permitted can thus be determined from the time which groups actually spend at strategic points along the route of visitation, and the size of groups can vary as a function of other factors, such as greater demands during holiday periods.

Key-Words: Air temperature; speleoclimate; tourism in caves; tourist carrying capacity, show cave.

Resumo

O monitoramento atmosférico em cavernas turísticas tem sido empregado no intuito de verificar as alterações causadas em função da visitação. Os procedimentos de monitoramento são feitos de forma a considerar os roteiros turísticos estabelecidos nas cavernas e refletir o efeito do tempo de permanência dos visitantes em seu interior. Com este propósito, foi estabelecido um programa de monitoramento atmosférico na caverna de Santana, de forma a oferecer suporte ao estudo de sua capacidade de carga espeleoturística. As pesquisas foram realizadas durante os procedimentos de visitação turística, permitindo a análise dos impactos da visitação em dois trechos específicos da caverna. O incremento térmico identificado foi de 1,1°C no salão do Cristo e de 1,3°C no salão do Encontro. No entanto, os dados e discussões apresentados neste artigo evidenciam que o impacto da visitação não apresenta linearidade entre a quantidade de pessoas presentes em um grupo de visitantes ou de seu total diário com a variação térmica. Observou-se que o tempo de permanência dos grupos em determinados pontos é um fator crítico na visitação espeleoturística. Das conclusões, evidencia-se que o número de visitas permitidas por dia deve considerar o tempo em que os grupos de visitantes ficam parados em determinados pontos do roteiro de visitação, bem como que o tamanho dos grupos de visitantes deve variar em função de flutuações atmosféricas e da sazonalidade turística.

Palavras-Chave: *Temperatura do ar; espeleoclima; espeleoturismo; capacidade de carga turística; cavernas turísticas.*

1. INTRODUCTION

Techniques for the monitoring of atmospheric parameters in caves are useful in the analysis of alterations in the environment due to tourist activities and, more recently, as a basis for paleoclimatic investigations.

Monitoring of cave conditions has been practiced since the 19th century in the region of Skocjanske jame, in Slovenia, where it was initiated in 1886 (Kranjc & Opara 2002), and it has long been used in Italian caves, such as the grotta Gigante (Cigna 1993) and Spanish caves such as those of

Altamira (Pulido-Bosch *et al.* 1997) and Águia (Domínguez-Villar *et al.* 2010), as well as in many others. In Brazil, however, regular studies monitoring the climate inside caves are rare, and mainly designed for the analysis of the impact of tourist visitation. The best examples with the most extensive data available are those for the cave Olhos d'Água (Carvalho 2001), the cave of Santana (Viana Jr. 2002), the cave of Ubajara (Veríssimo *et al.* 2003), the cave of Lago Azul (Boggiani *et al.* 2001, 2007) and the cave Colorida (Rocha, 2010), as well as those linked to paleoclimate studies based on the geochemical investigation of stalagmites (Sondag *et al.* 2003; Karmann *et al.* 2007).

The present study was developed for the investigation of the use of the monitoring of atmospheric parameters for management of show caves. The data, collected during various stages over a two-year period, was designed to identify the dynamics of the circulation of the air in the cave and its relationship with possible impacts due to visitation. The underground atmosphere is assumed to act dynamically, with variation on various scales controlled by spatial aspects such as the quantity and extension of the galleries and the distance from the outside environment (Freitas & Schmekal 2003; Fernández-Cortés *et al.* 2006a; Luetscher *et al.* 2008), as well as the daily and seasonal variations

(Pulido-Bosch *et al.* 1997; Kranjc & Opara 2002; Russell & MacLean 2007).

2. MATERIAL AND METHODS

The field work was conducted in the cave of Santana (Fig. 1), located in the State Tourist Park of the Upper Ribeira (PETAR), in the southeastern part of the state of São Paulo, in Brazil. This cave is one of the most-visited show caves in Brazil, with an annual visitation varying from 20,000 to 30,000 in the past few decades. It is one of the largest caves in the state, with a horizontal development exceeding 7 km already mapped. The first 480 m are visited on a regular basis, including part of the lower gallery along the Roncador river and various galleries on upper levels (Fig. 2).

The monitoring of the air in the cave of Santana was initiated in 2008, and these studies were terminated in 2010; they included measures of temperature and relative humidity of the air, temperature of the water and the surface of the speleothems, and the concentration of CO₂, as well as air flow. Previous research results were published in the works of Lobo (2015) and Lobo *et al.* (2015). However, the continuity of the data analysis allowed to highlight the aspects discussed in this article. The points monitored and the characteristics measured at each are identified in Fig. 2.

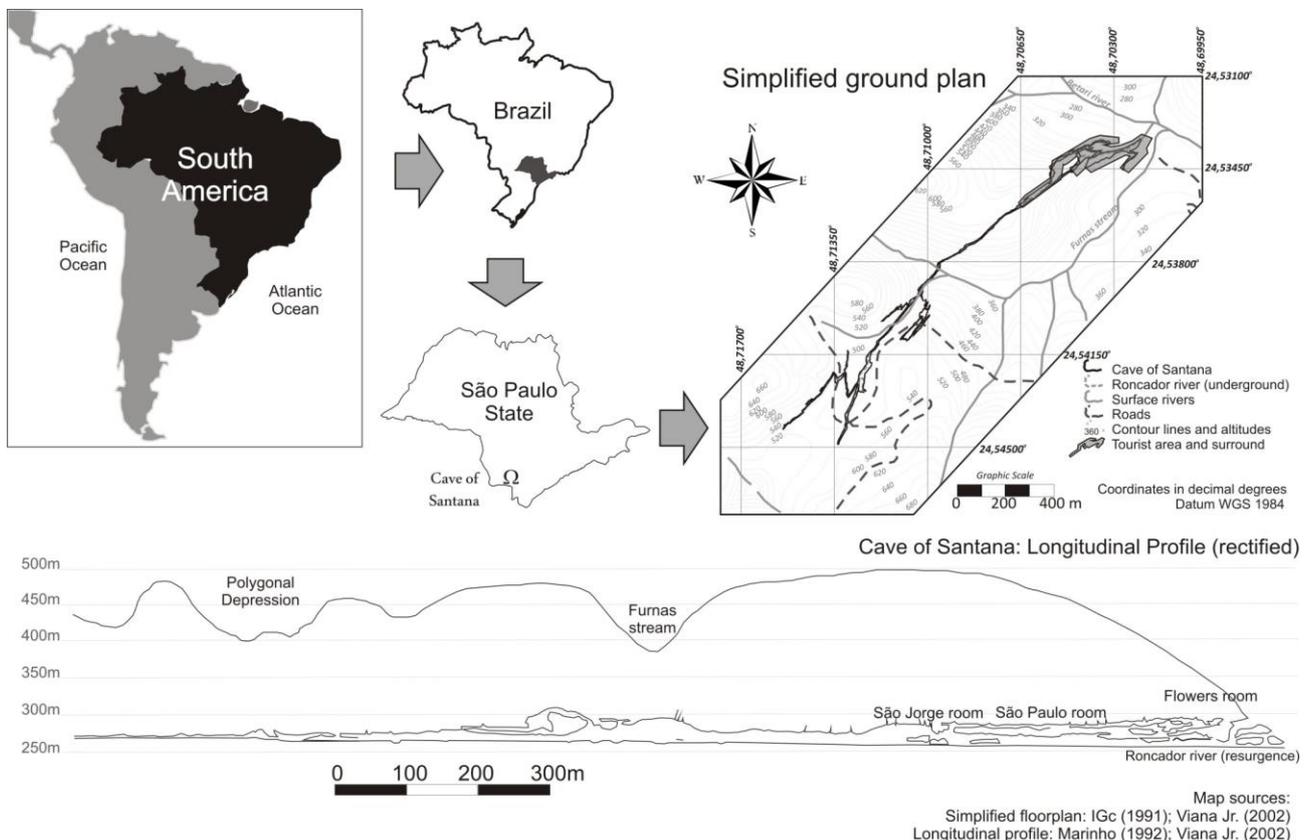


Figure 1: Location of cave of Santana.

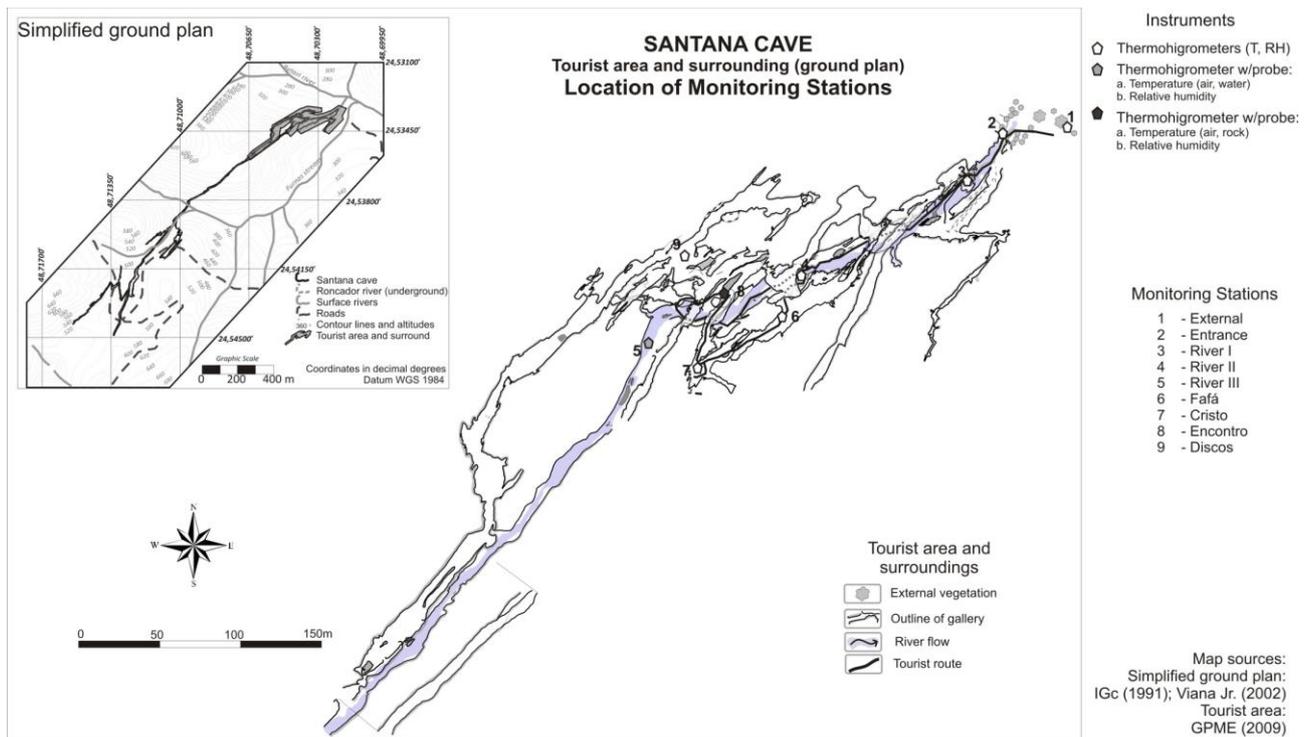


Figure 2: Details of tourist area and surroundings, including the monitoring stations.

The measurement of the air involved the use of Testo thermohygrometers. Nine points were monitored (Fig. 2), including one outside the cave and one at the immediate interface between the internal and external areas. The time between data collections varied from 15 to 30 min., depending on the phase of the research. The longest series obtained was an entire annual cycle of climatic seasons, including information about the rains which fell outside the cave, as rainfall is quite elevated throughout the year in the region, even in the drier winter months of June to August.

The analysis of the data used statistical procedures for dispersion and central trends (mean, median, mode, maximum, minimum, amplitude, and standard deviation), as well as procedures for the analysis of temporal series (autocorrelation, spectral density, and cross correlations).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results obtained for the cave of Santana are presented and discussed as a function of the monitoring stations (Fig. 2), considering the data of the period from 2009-2010 (Fig. 3a, b).

Figure 3 shows the data obtained, divided between the monitoring stations with higher (Figure 3a) and lower (Figure 3b) thermal amplitude. The annual average of this period for the air temperature in the external environment was 19.9 °C, with a maximum of 32.9 °C and a minimum of 6.1 °C. The average relative humidity was 98.9%, varying

between 99.9% and 60.2%. Inside the cave, River station III (located in a place not subject to tourism) revealed a minimum temperature of 17.3 °C, and a maximum of 19.3 °C, with an average of 18.28 °C. The relative humidity of the air was constant at 99.9% throughout the entire period of monitoring, with variation observed until the surrounding area of River station II.

Most of the stations monitored were found to fit into two general patterns of variation in relation to the air temperature: relatively large variations between day and night at the external stations and those along the Roncador river, and slight variations, only barely visible upon visual analysis of the graph, found at the stations in the upper galleries. This pattern was similar to that presented by Kranjc and Opara (2002) for the caves of Skocjanske jame in Slovenia; there the variation was related to distance from the external atmosphere, as well as to differences related to the level of galleries, which implies a certain stratification of the underground atmosphere. However, the patterns of temperature variation at the stations of the Cristo and the Encontro room were totally different from the others, with the registration of anomalous data. The variations observed coincided with the passage of groups of visitors, as has already been demonstrated in studies of other caves (e.g. Pulido-Bosch *et al.* 1997; Carrasco *et al.* 2002; Calaforra *et al.* 2003), which can alter the temperature of the air at specific points. The time required for stabilization after the passage of visitors varied depending on the level of circulation of energy and mass at the specific point

in the cave, as shown in papers such as those of (2010). Fig. 4 presents conceptual models to illustrate these patterns of variability. Fernández-Cortés *et al.* (2006a) and Lobo and Zago

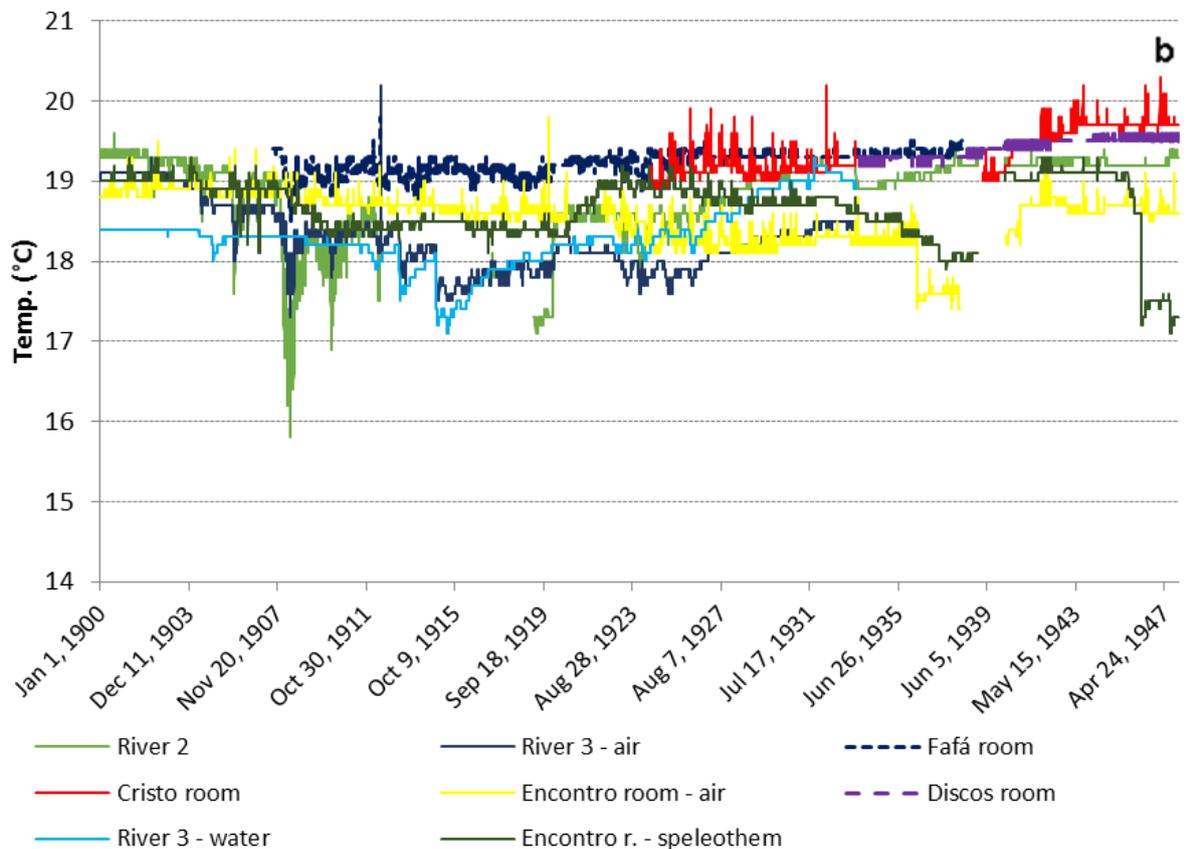
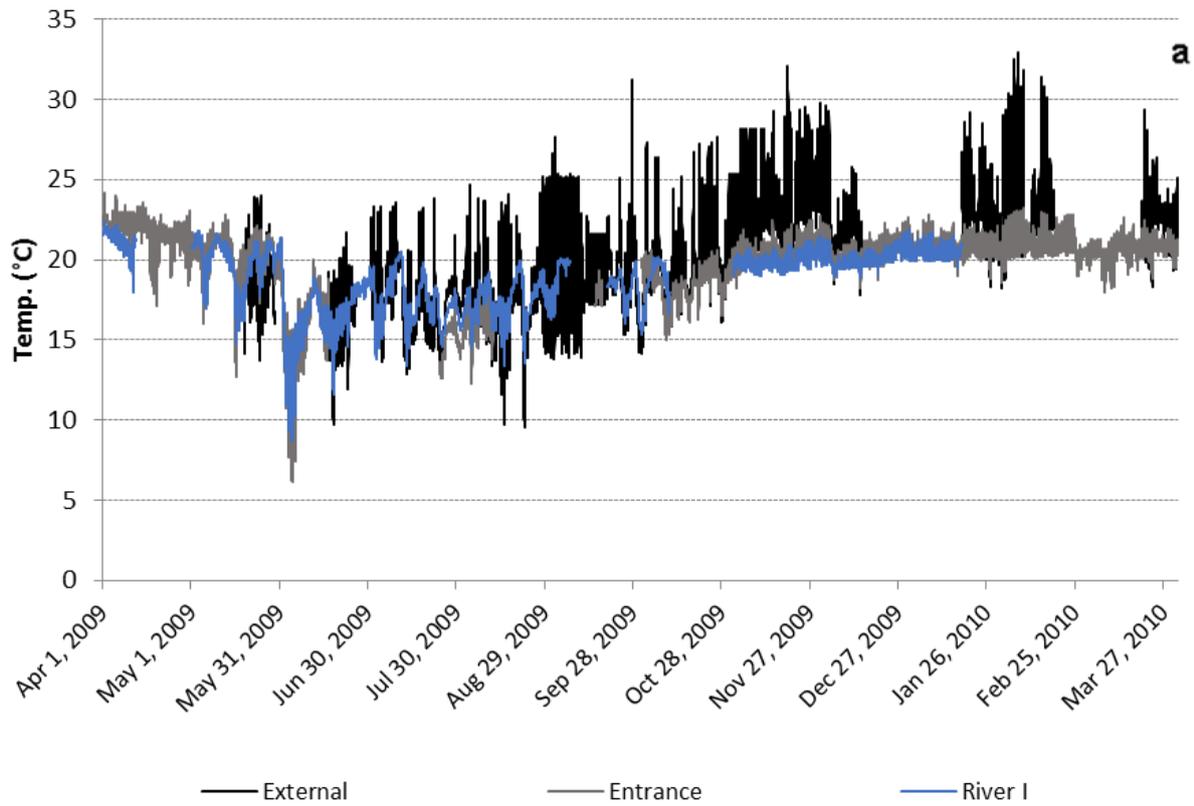


Figure 3: Original series of annual temperature during speleoclimatic monitoring of the cave of Santana (2009-2010): a) monitoring stations with higher thermal variation; b) monitoring stations with lower thermal variation.

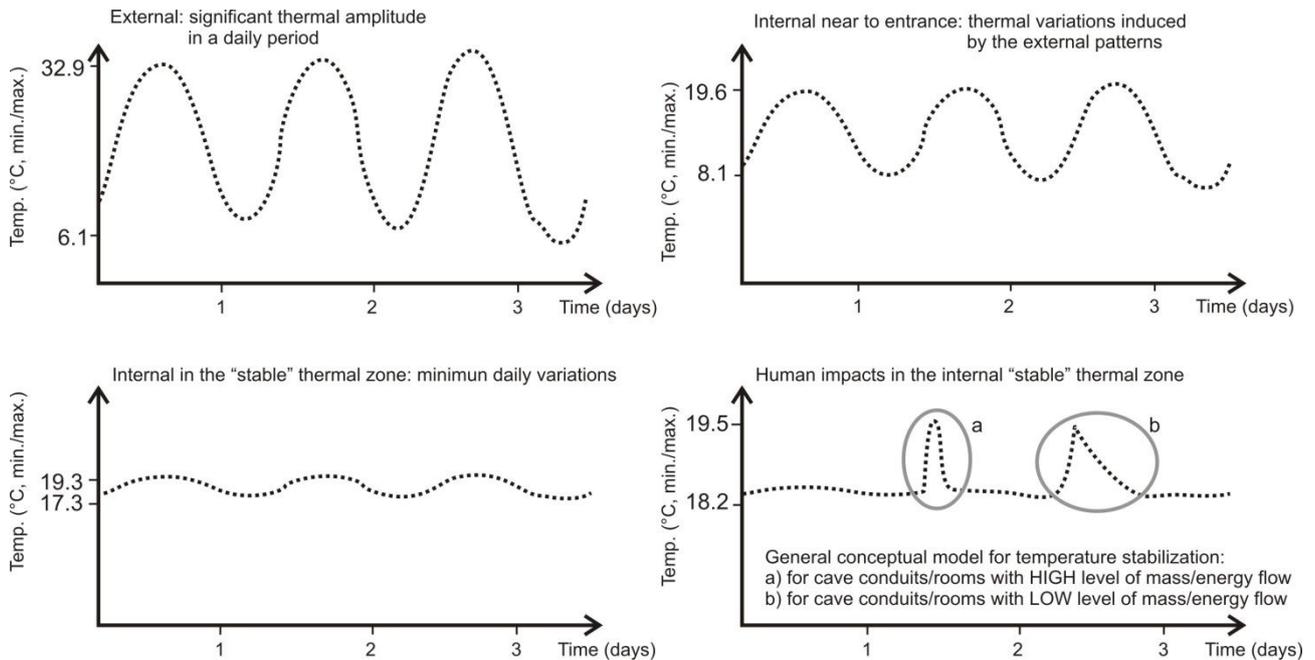


Figure 4: Conceptual models of the basic patterns of variability in twenty-four hours periods in the air of the cave of Santana.

As seen in Fig. 4, the variation in temperature follow a twenty-four hour cycle, with great variation at the external station. It is attenuated as one moves deeper into the cave. In the cave of Santana, in the access gallery (which houses the Roncador river) after station III on the river and in the upper galleries, temperature variation was quite limited, providing a visual sensation of “stability”, although this must be viewed with certain reservations since natural variations do still occur. In these zones, the impacts of visitation on the temperature could be observed.

During the monitored period, experiments were conducted to verify the degree of influence of the visitors presence on the analyzed atmospheric parameters. The data of visitation were then correlated with those of the daily maximums of the stations of the Cristo and Encontro room, which registered variations in temperature outside the natural patterns of atmospheric variation (Fig. 5), not only for the air itself, but also for the host rock, for which the temperature was also monitored.

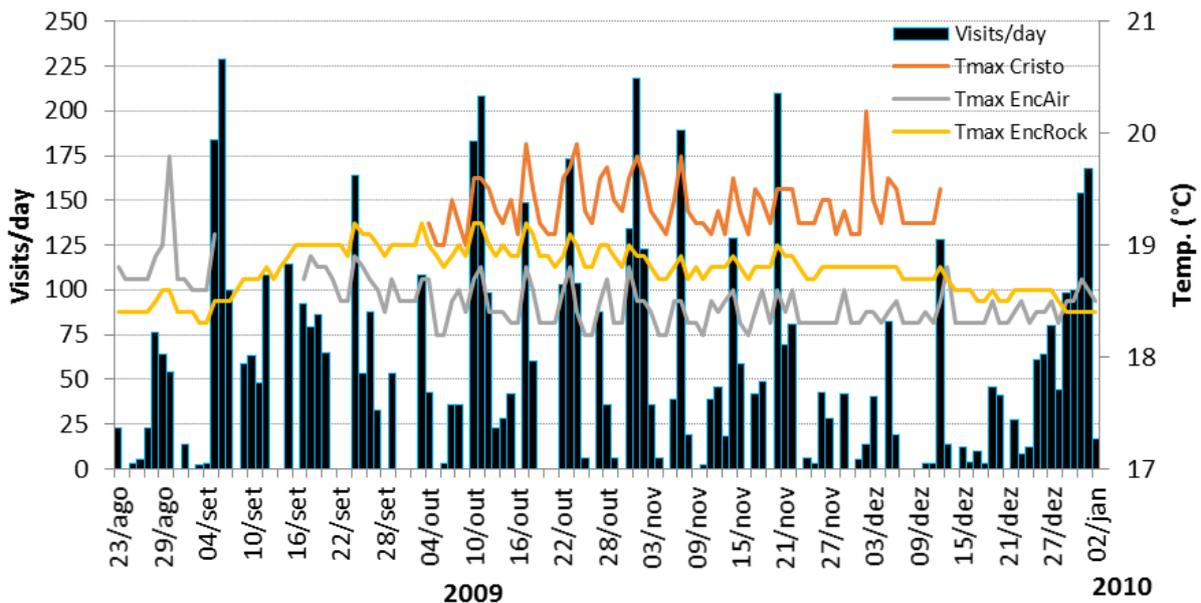


Figure 5: Number of visits / day x maximal temperature at the stations of the Cristo and the Encontro room from August 23, 2009, to January 2, 2010.

Fig. 5 makes possible the visualization of these correlations. The series of collected data were than submitted to a descriptive statistical analysis using a Pearson Correlation Coefficient (r). The coefficients for the stations of the Cristo (0.706) and Encontro room (0.622) were highly correlated, showing the existence of the interference of the human presence on the values measured. For these data, a descriptive statistical analysis using cross correlations was also made (Fig. 6).

The correlation between daily visitation and the data of the series of observations is quite significant. For the station of the Cristo (Fig. 6a), a maximum index of 0.706, with no lag, was obtained. At the station of the Encontro room (6b), the correlation was 0.622, also without any temporal lag. These indices, in conjunction with the Pearson's r , show the linearity between the entrance of elements external to the system (the visitation) and the respective response (the local increase in temperature). Although the graphics and the statistical analyses suggest a direct relation between alterations in temperature and the presence of groups of visitors, a more detailed analysis for the period between October 30 and November 3, 2009, was also made (Fig. 7).

Fig. 7 provides the proof of the anthropic origin of the impact on the temperature at the stations analyzed. The more detailed study shows that a temperature increase of from 0.3 °C to 0.6 °C occurs right after the visitation of groups containing up to 23 visitors. On October 30, a day in which no

visitation to the cave was permitted, only a very slight variation was observed, similar to the pattern observed for the other rooms monitored. The variations on November 3 are especially important, since only two groups of 18 visitors each visited the area, but they consisted of students in special activities which involved a longer stay inside the cave, and significant temperature alterations were registered. This shows that in general both the number of persons and the time of residence are relevant in the occurrence of impacts on the underground atmosphere.

The statistical analyses of the correlation of these data confirm the conclusions reached above. The coefficients found prove the existence of a statistically significant correlation between the presence of visitors and the temperature of the air at the stations of the Cristo and the Encontro room. The correlation indices of the crossed correlations confirm this interpretation, with values of 0.721 for the station of the Cristo, with a lag of one hour and 0.595 for the station of the Encontro room, also with a time lag of one hour.

The temporal lags observed are coherent with the condition of use of the cave, given the normal time between entrance and visitation in these rooms, since groups generally take about an hour to get at the rooms of the Cristo and Encontro. Based on the found data, a preliminary conclusion is that the air temperature at the station of the Encontro room drops to normal after 6-7 hours after an increase of up to 0.6 °C.

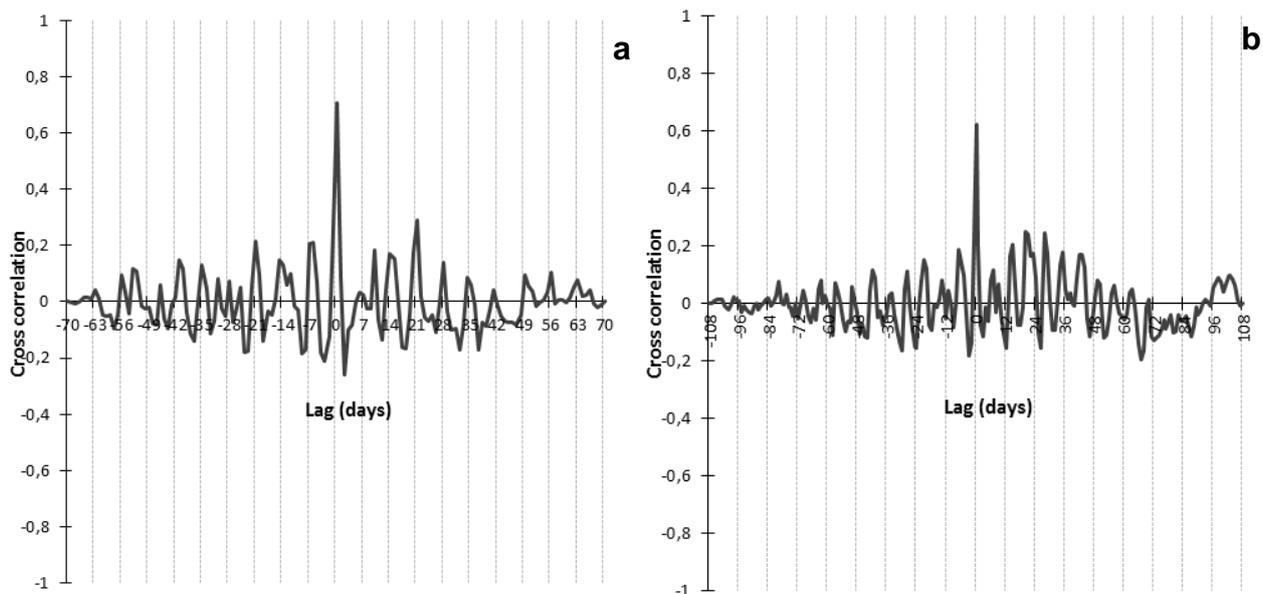


Figure 6: Crossed correlograms relating daily visitation with the temperature at the stations of the Cristo (a) and the Encontro room (b) during September and December, 2009.

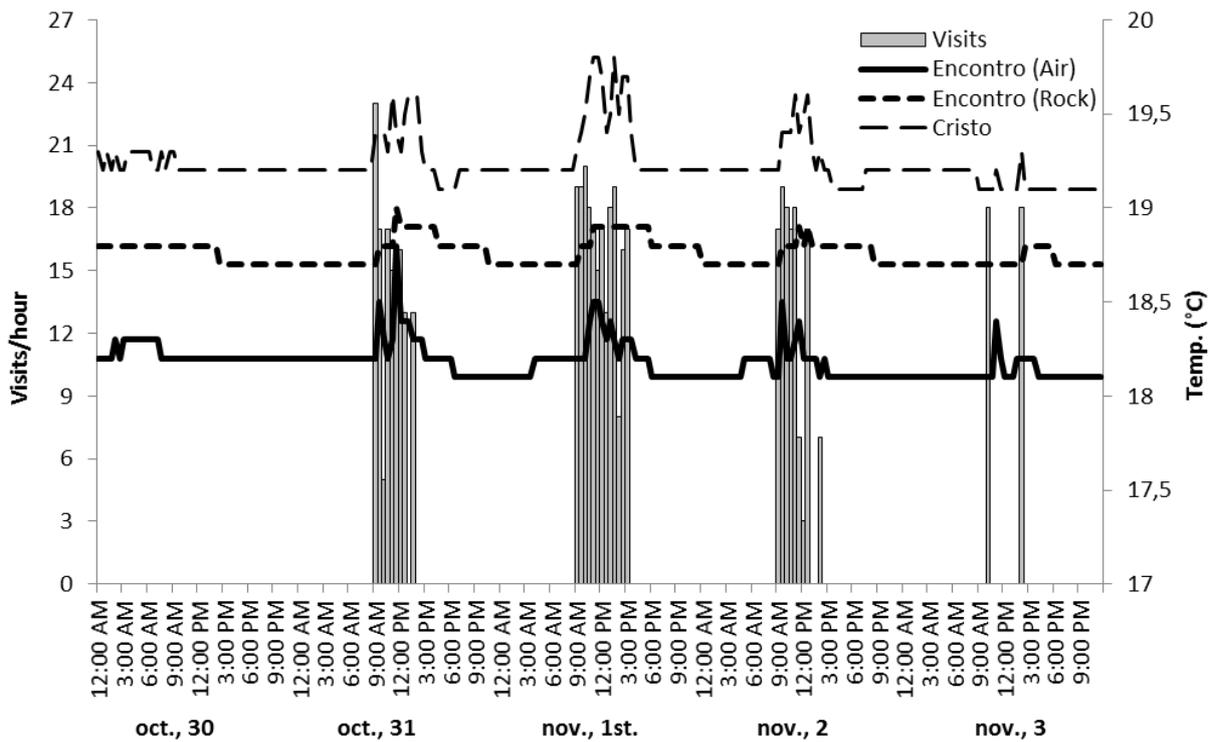


Figure 7: Hourly variation in temperature at the stations of the Cristo and the Encontro room between October 30 and November 3, 2009, correlated with visitation.

Changes in the elementary physico-chemical characteristics of the underground atmosphere have been widely researched, especially in European and North American caves. In some cases, the presence of humans has been totally avoided, such as in those containing especially fragile rupestrian paintings, such as the cave of Lascaux in France (Bastian & Alabouvette 2009) or when instable secondary chemical deposits are involved, such as in the geode of Pulpí in Spain (Fernández-Cortés *et al.* 2006b), since even minimal atmospheric alterations can generate irreversible damages to the paintings and the host rocks or to the minerals in the caves. In other cases, the human presence can be tolerated, with the challenge being that of identifying the limits of tolerance for frequency and permanence necessary to protect the biological and geological aspects of the underground environment. In the cave of Santana, at least along the traditional tour circuit, there are no rupestrian paintings, nor rare mineral formations justifying *a priori* the adoption of inflexible limitations on the number of visitors, especially when the dimensions of the cave and the internal infra-structure are considered. The challenge consists of reaching a better understanding of the dynamics of the atmosphere. With this, acceptable limits for the main atmospheric characteristics can be identified and models can be established, which will mitigate as much as possible the impacts. Thus, the number of visits permitted will be as many as

can safely be allowed, without permanently affecting the atmosphere.

In order to determine these levels, an initial analysis of the characteristics at the monitoring stations was made. For temperature, the data were analyzed as a function of the daily thermal variation. This decision was based on the work of Hoyos *et al.* (1998), Sánchez-Moral *et al.* (1999), Calaforra *et al.* (2003) and Fernández-Cortés *et al.* (2006a), which identified the natural variations in the environments researched to then correlate them directly with visitation and, based on these results, establish daily limits for visitation. For the present paper, it is argued that, in the absence of special environmental aspects which can under no circumstances be submitted to extreme variation, these limits may be too limiting, since they do not consider the dynamics of equilibrium.

The daily thermal amplitude for the stations of the Cristo and Encontro for the period of August 23, 2009, to January 1, 2010, as well as for the period of July 1 to September 14, 2010, for the station Cristo were then correlated with the data available about daily visitation. The results for air temperature are given in Fig. 8.

For the comparison of the data provided in Fig. 8, separate statistical analyses were conducted for days with and without visitation (Tabs. 1 and 2).

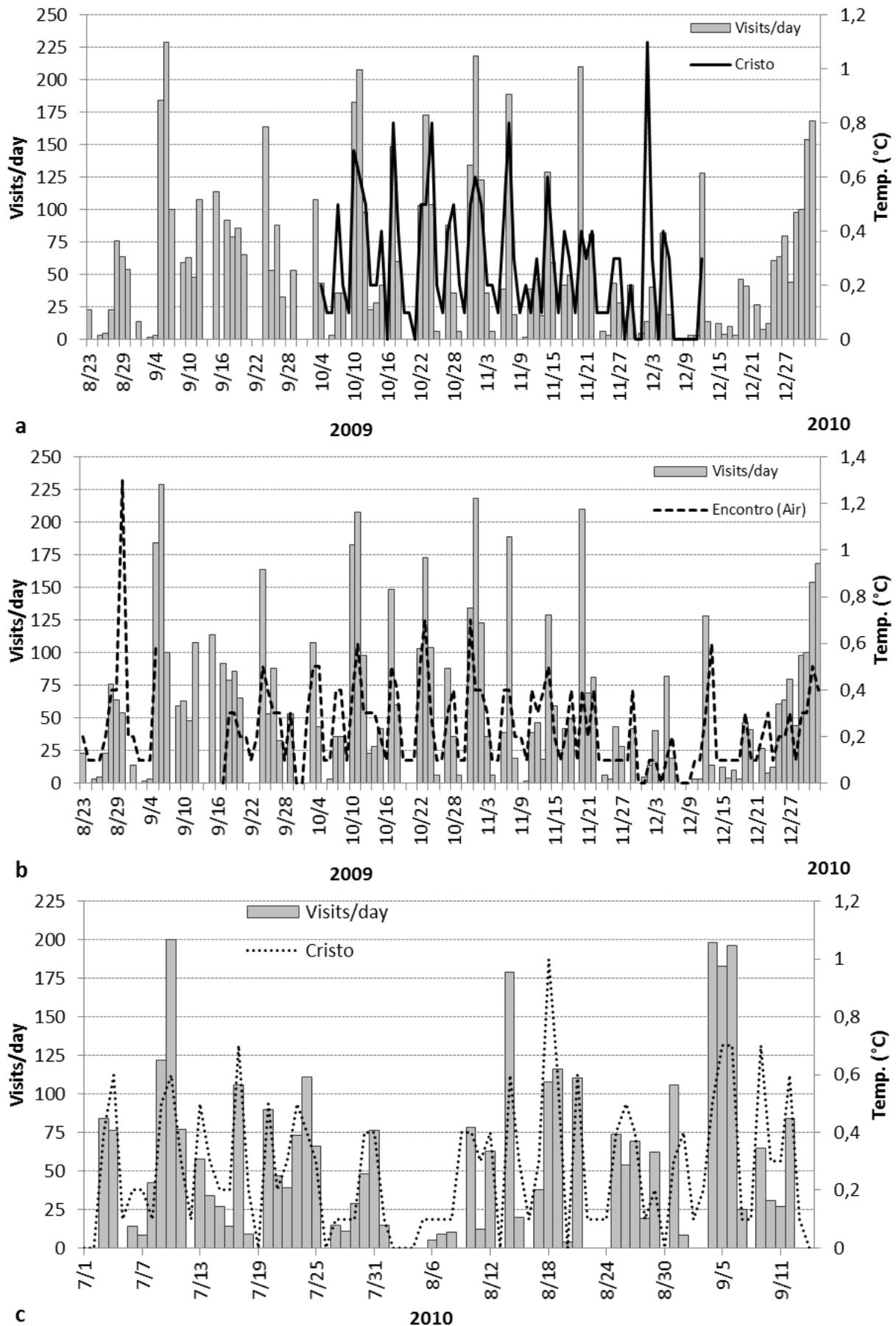


Figure 8: Daily thermal amplitude in air temperature for the stations of the Cristo (a) and Encontro room (b) for the period from August 23, 2009, to January 1, 2010, as well as for that of the Cristo from July 1 to September 14, 2010 (c) and their relation to visitation.

Table 1: Daily variation (air temperature) and presence of visitors in the room of the Cristo.

Daily variation (°C)	Cristo Room			
	Number of days		Number of visitors	
	Without visits	With visits	Mínimum	Máximum
0	18	4	3	5
0.1	21	15	3	42
0.2	1	17	2	62
0.3	-	20	12	128
0.4	1	17	8	210
0.5	-	13	36	198
0.6	-	9	76	218
0.7	-	5	65	196
0.8	-	3	104	189
1.0	-	1	108	108
1.1	-	1	14	14

Table 2: Daily variation (air temperature) and presence of visitors in the Encontro room.

Daily variation (°C)	Encontro room (Air)			
	Number of days		Number of visitors	
	Without visits	With visits	Minimum	Maximum
0	8	3	5	92
0.1	19	26	2	82
0.2	4	13	14	69
0.3	1	18	8	128
0.4	-	19	18	218
0.5	-	8	43	164
0.6	-	3	14	208
0.7	-	2	134	173
1.3	-	1	54	54

As can be seen in Tab. 1 and 2, for these two rooms, the daily variation in temperature without visitation was limited to 0.1 °C. The presence of visitors led to maximum daily variations of 1.1 °C (Cristo room) to 1.3 °C (Encontro room), although most were in the range of 0.1 to 0.5 °C (Cristo room) and 0,1 to 0.4 °C (Encontro room), which are larger than those reported for other caves (e.g. Domínguez-Villar *et al.* 2010). These variations were generated by groups of varying sizes, with only 2 visitors in the Cristo room being sufficient to increase the temperature 0.2 °C, while 12 raised it 0.3 °C and 8 to 0.4 °C. Despite the fact that a variation of 0.4 °C was also registered without the presence of visitors, it seems likely that individuals involved in research or inspection may have been present, since such activities are not always registered in the control of visitation. In the Encontro room, the presence of two individuals generated an increase of 0.1 °C, while that of 18 persons raised it 0.4 °C.

Two basic options are available for dealing with the atmospheric dynamics of these two rooms, and they both would have repercussions for, among other things, the definition of carrying capacity. The first would be that anthropically-caused variations should be allowed to surpass natural variation (Hoyos *et al.* 1998; Cigna 2010; Calaforra *et al.* 2003); and the second that the carrying capacity should be based on the temperature, since this is the critical factor in relation to the immediate response to the presence of people (Cigna & Forti 1988), although in this case visitation would be limited to a single visitor in the room of the Cristo, since 2 people led to an increase of 0.2 °C and to 14 for the Encontro room, since this number generated enough heat to increase the normal variation by 0.1 °C.

However, the carrying capacity Should not be the main issue in the management of tourism in caves (Freitas 2010), since it is necessary to consider not only the ideal conditions for the environment, but also the most adequate techniques of

management for each situation. The application of techniques developed for other realities should not necessarily be adopted. Techniques developed for caves with a restricted circulation of air would not be especially relevant for the reality of the cave of Santana, even though great variation in the environmental response to the pressure exercised by visitation was observed. For example, Tab. 4 shows that with the passage of 92 persons in a single day did not alter the temperature of the air in the Encontro room, which shows that the adoption of the traditional approach would be problematic – a situation possibly due to the complex and diversified atmospheric dynamics of the cave. Moreover, the response to visitation is not linear, since in one case a group of only 14 persons generated a daily increase of 1.1 °C in the room of the Cristo, while the visitation of 210, divided into various groups in a single day, caused an increase of only 0.4 °C. It seems more likely that the increase of temperature is directly linked to the length of time in which visitors remain in the rooms, rather than the number of persons, as such. This hypothesis is based on the fact

that the guides tend to show a specific speleothem (resembling the face of Jesus Christ) to the visitors, but this is visible only after entering a small lateral gallery, and must be done one at a time, which leaves all the other visitors sitting the larger room waiting their turn. In the Encontro room, a similarly time-consuming tradition has developed, with the guides grouping the visitors so all lights can be extinguished and they can experience the total darkness of the cave environment.

It should be noted that even with these practices the temperature of the air in the room of the Cristo is reestablished within a maximum of 8 hours, whereas in the Encontro room this is reestablished within 7 hours. Moreover, there is no accumulative effect as a function of daily visitation, so that the air temperature, after the impact, returns to the original value, or with minimal variations of ±0.1 °C in certain cases. The data were thus reorganized (Tabs. 3 and 4) to show the total time required for a stabilization after thermal impacts generated in the stations of the Cristo and Encontro room.

Table 3: Analysis of total time for air temperature stabilization on days of greatest temperature increase – station of the Cristo room.

Date	Temp. (°C) prior to visitation (9h)	Peak temperature (°C)	Time of peak	Time for temperature stabilization	Recovery interval (min.)
10.Oct. 2009	19	19.5	15h 00min.	21h 30min.	390
11.Oct. 2009	19	19.6	13h 30min.	17h 30min.	240
12.Oct. 2009	19.1	19.5	10h 30min.	15h 00min.	270
17.Oct. 2009	19.1	19.9	14h 30min.	2h 30min.	720
18.Oct. 2009	19.1	19.5	10h 00min.	13h 30min.	210
27.Oct. 2009	19.2	19.6	14h 00min.	23h 30min.	570
31.Oct. 2009	19.2	19.6	14h 00min.	16h 30min.	150
1.Nov.2009	19.2	19.8	13h 30min.	16h 00min.	150
2.Nov.2009	19.2	19.6	12h 30min.	15h 30min.	180
7.Nov.2009	19	19.8	15h 00min.	17h 00min.	120
14.Nov.2009	19.1	19.6	11h 00min.	14h 30min.	210
20.Nov.2009	19.1	19.5	14h 30min.	16h 30min.	120
4.July 2010	19.1	19.7	15h 00min.	17h 20min.	260
17.July 2010	19.5	20.2	11h 20min.	19h 20min.	180 ¹
23.July 2010	19.7	20.1	11h 00min.	13h 40min.	160
25.July 2010	19.7	20	11h 20min.	16h 40min.	140 ¹
30.July 2010	19.7	20.1	11h 00min.	13h 00min.	120
12.Aug. 2010	20	20.4	11h 40min.	13h 20min.	100
14.Aug. 2010	20	20.5	16h 20min.	19h 20min.	180
18.Aug. 2010	20	20.9	16h 00min.	19h 40min.	220
19.Aug. 2010	19,9	20.5	15h 00min.	19h 00min.	360
21.Aug. 2010	20	20.4	15h 00min.	18h 20min.	200
5.Sept. 2010	20	20.7	13h 00min.	0h 40min.	700
6.Sept. 2010	20	20.7	14h 20min.	19h 20min.	300
9.Sept. 2010	20	20.7	15h 40min.	18h 00min.	140

¹ On July 14 and 25, the stabilization time was not computed as a function of the highest peak, but rather for a second, later peak.

Table 4: Analysis of total time for air temperature stabilization on days of greatest temperature increase – station of the Encontro room.

Date	Temp. (°C) prior to visitation (9h)	Peak temperature (°C)	Time of peak	Time for temperature stabilization	Recovery interval (min.)
4.Oct.2009	18.3	18.7	12h 30min.	16h 00min.	150
10.Oct.2009	18.4	18.7	12h 30min.	16h 30min.	240
11.Oct.2009	18.4	18.8	13h 00min.	16h 30min.	210
12.Oct.2009	18.2	18.4	12h 30min.	16h 30min.	240
17.Oct.2009	18.4	18.8	13h 00min.	16h 00min.	180
18.Oct.2009	18.3	18.6	10h 00min.	13h 00min.	180
31.Oct.2009	18.2	18.8	11h 30min.	15h 00min.	210
1.Nov.2009	18.2	18.5	11h 30min.	16h 00min.	270
2.Nov.2009	18.1	18.5	9h 30min.	14h 00min.	180 ¹
7.Nov.2009	18.1	18.5	15h 00min.	18h 00min.	180
14.Nov.2009	18.2	18.6	11h 30min.	16h 00min.	270
20.Nov.2009	18.2	18.6	15h 00min.	18h 30min.	210

¹ On Nov. 2, the time for stabilization was not computed as a function of the highest peak, But rather for a later, second peak.

An initial qualitative analysis of the data was used to organize Tabs. 3 and 4. This considered the impacts with a magnitude close to the margin of error of the instruments (0.1 to 0.2 °C), as well as those for which the time of stabilization was less than 1 hour after the impact.

The longest recovery time registered for the station of the Cristo was 720 min., on October 17, 2009. At the station of the Encontro room, a time of 270 min. was registered on two occasions: on November 1 and 14, 2009. At both stations, the largest values were obtained on weekends and holidays.

The average recovery time of the station of the Cristo was 255.6 min., while for the station of the Encontro room it was 210 min. This comparison of the recuperation from the largest temperature increases showed that the room of the Cristo is the main “bottleneck” in relation to avoiding anthropic impacts on the air temperature along the route of visitation of the cave of Santana. The data in Tab. 3 were thus described using a histogram (Fig. 9).

Most of the time, the total time for stabilization of air temperature at the Cristo station was less than 300 min. The average for the series was 255.6 min., and the median was 200 min. The extreme values, 550 min. and 700 min. were exceptions to the general pattern of environmental response. The peaks occurred on October 17 (720 min. for stabilization, with an accumulated visitation of 149 visits/day) and October 27 (570 min.; 88 visits/day) in 2009 and September 5, 2010 (700 min.; 183 visits/day). However, no direct relation was found between the total number of visits and the time of stabilization. For example, on October 11, 2009, and July 10, 2010, a total of 208 and 200 visits

per day were received, respectively, but the total stabilization time was only 240 min. and 180 min., for each of these days. The raise in temperature was thus deemed not to be the best value for understanding total stabilization time.

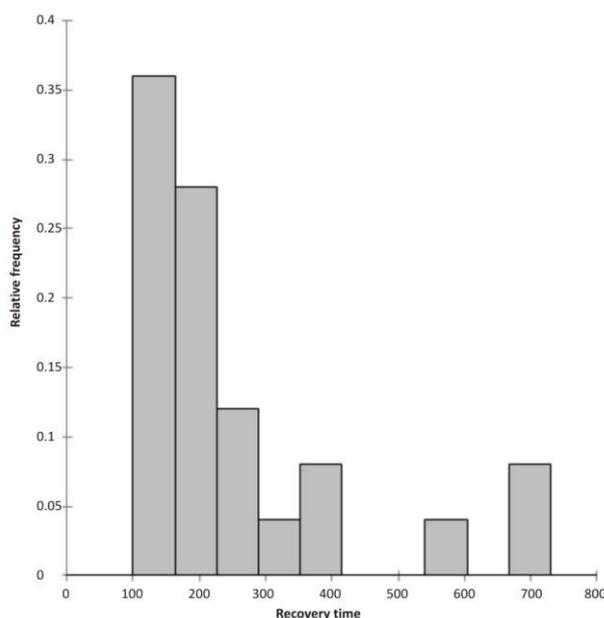


Figure 9: Analysis of total stabilization time for air temperature on the days with greatest temperature increase –station of the Cristo.

4. CONCLUSIONS

The monitoring permitted the identification of a varying pattern of atmospheric responses for the air temperature in relation to the input generated by visitation of the cave of Santana. Considering the use of atmospheric data for the limitation of

visitation, various reservations arise in relation to the correlation of atmospheric variables with the presence of visitors during a single event, or even over slightly longer intervals of time. The adoption of this single event for modeling the carrying capacity may lead to exaggerations in the limits imposed. If the limits are too lenient, the environment will suffer, whereas if they are too strict, it is the society and management which will confront unnecessary restrictions.

It is also important to point out that the variation in air temperature is not proportional to the number of persons per group, or even the total number of visits per day. This is important because of the traditional paradigm linearly correlating carrying capacity to these parameters. In the case of the cave of Santana, and presumably in others with similar environmental characteristics, the key parameter seems to be the time spent by a group at a specific location, which suggests a new option for

the management of tourist visitation in which it is the time spent at the various points along the trail in the cave which should be prioritized. The number of people in a group is still important, especially for questions of comfort, safety, and the quality of the experience, but this number is only secondary in relation to the carrying capacity as such. Moreover, the total number of visits per day can be established as a result of the interaction between the time spent in the cave, the time needed by the cave for a return to the stable state, and the number of people per group, with variations possible depending on the season of the year and visitation demands.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wish to thank to prof. Dr. Linda Gentry El-Dash (SBE), for her support with the translation of the original manuscript.

REFERENCES

- BASTIAN, F.; ALABOUVETTE, C. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux cave. **International Journal of Speleology**, v.38, n.1, p.55-60, 2009.
- BOGGIANI, P.C.; GALATI, E.A.B.; DAMASCENO, G.A.; NUNES, V.L.B.; SHIRAKAWA, M.A.; SILVA, O.J.; MORACCHIOLI, N.; GESICKI, A.L.D., RIBAS, M.M.E.; MARRA, R.J.C.; SOUSA, B.P.C. de. Environmental diagnostics as a toll for the planning of tourist activity – the case of Lago Azul and Nossa Sra. Aparecida caves – Bonito/MS – Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, Brasília. **Proceedings**. Brasília: UIS/SBE, 2001. p. 299-300.
- BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J.; GESICKI, A.L.D.; GALATI, E.; SALLES, L.O.; LIMA, M.M.E.R. Definição de capacidade de carga turística das cavernas do Monumento Natural Gruta do Lago Azul (Bonito, MS). **Geociências**, v.26, n.4, p.333- 348, 2007.
- CALAFORRA, J.M.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J.; PULIDO-BOSCH, A. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. **Environmental Conservation**, v.30, n.2, p.160-167, 2003.
- CARRASCO, F.; VADILLO, I.; LIÑÁN, C.; ANDREO, B.; DURÁN, J.J. Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja cave (Malaga, Spain). **Acta Carsologica**, v.31, n.1, p.105-122, 2002.
- CARVALHO, S.M. Microclimatologia subterrânea da gruta Olhos d'Água (Castro, PR). In: DITZEL, C. de H.M.; SAHR, C.L.L. **Espaço e cultura: Ponta Grossa e os Campos Gerais**. Ponta Grossa: UEPG, 2001. p.443-462.
- CIGNA, A.A. Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. **Environmental Geology**, v.21, p.173-180, 1993.
- CIGNA, A. A. Show cave development with special references to active caves. **Tourism and Karst Areas**, v.4, n.1, p.7-16, 2010. www.cavernas.org.br/ptpc/tka_v4_n1_007-016.pdf

- CIGNA, A.A.; FORTI, P. The environmental impact assessment of a tourist cave. In: UIS (ed.) CAVE TOURISM INTERNATIONAL SYMPOSIUM AT-170 ANNIVERSARY OF POSTOJNSKA JAMA, 1988, Postojna (Yugoslavia), **Proceedings**. Postojna: UIS, 1988. p. 29-38.
- DOMÍNGUEZ-VILLAR, D.; FAIRCHILD, I.J.; CARRASCO, R.M.; PEDRAZA, J.; BAKER, A. The effect of visitors in a touristic cave and the resulting constraints on natural thermal conditions for paleoclimate studies (Eagle cave, central Spain). **Acta Carsologica**, v.39, n.3, p.491-502, 2010.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J. Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. **International Journal of Climatology**, v.26, p.691-706, 2006a.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; JIMÉNEZ-ESPINOSA, R.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Geostatistical spatiotemporal analysis of air temperature as an aid to delineating thermal stability zones in a potential show cave: implications for environmental management. **Journal of Environmental Management**, v.81, p.371- 383, 2006b.
- FREITAS, C.R. de. The role and the importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. **Acta Carsologica**, v.39, n.3, p.477-489, 2010.
- FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm cave, New Zealand. **International Journal of Climatology**, v.23, p.557-575, 2003.
- GPME – GRUPO PIERRE MARTIN DE ESPELEOLOGIA. **Mapa da caverna de Santana**. São Paulo: GPME, 2009. 1 mapa. Escala 1:500.
- HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑAVÉRAS, J.C.; SÁNCHEZ-MORAL, S.; SANZ-RUBIO, E. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo cave, Northern Spain). **Environmental Geology**, v.33, n.4, p.231-242, 1998.
- IGC – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA USP. **Mapa da caverna de Santana**. São Paulo: IGc/USP, 1991. 1 mapa. Escala 1:500.
- KARMANN, I.; CRUZ JUNIOR, F.W.; VIANA JR., O.; BURNS, S.J. Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana-Pérolas cave system, Brazil. **Chemical Geology**, v.244, 232-247, 2007.
- KRANJC, A.; OPARA, B. Temperature monitoring in Skocjanske Jame caves. **Acta Carsologica**, v.31, n.1, p.85-96, 2002.
- LOBO, H.A.S. Tourist carrying capacity of Santana cave (PETAR-SP, Brazil): A new method based on a critical atmospheric parameter. **Tourism Management Perspectives**, v.16, p.67-75, 2015.
- LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Iluminação com carbureteiras e impactos ambientais no microclima de cavernas: estudo de caso da lap do Penhasco, Buritinópolis-GO. **Geografia**, v.35, n.1, p.183-196, 2010.
- LOBO, H.A.S.; BOGGIANI, P.C.; PERINOTTO, J.A.J. Speleoclimate dynamics in Santana Cave (PETAR, São Paulo State, Brazil): general characterization and implications for tourist management. **International Journal of Speleology**, v.44, n.1, p.61-73, 2015.
- LUETSCHER, M.; LISMONDE, B.; JEANNIN, P.Y. Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system: Monlesi cave, Swiss Jura mountains. **Journal of Geophysical Research**, v.113, p.1-13, 2008.
- MARINHO, M. de A. **Contribuição à geomorfologia cárstica do Vale do Betari, Iporanga – Apiaí, São Paulo**. 1992. 73 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1992.

- PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W.; LÓPEZ-CHICANO, M.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, M.; VALLEJOS, A. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). **Environmental Geology**, v.31 n.3/4, p.142-149, 1997.
- ROCHA, B.N. **Estudo microclimático do ambiente de cavernas, Parque Estadual Intervales, SP**. 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- RUSSELL, M.J.; MACLEAN, V.L. Management issues in a Tasmanian tourist cave: potential microclimatic impacts of cave modifications. **Journal of Environmental Management**, v.87, p.474-483, 2007.
- SÁNCHEZ-MORAL, S.; SOLER, V.; CAÑAVERAS, J.C.; SANZ-RUBIO, E.; VAN GRIEKEN, R.; GYSELS, K. Inorganic deterioration affecting Altamira cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. **The Science of the Total Environment**, v.243/244, p.67-84, 1999.
- SONDAG, F.; RUYMBEKE, M.V.; SOUBIÈS, F.; SANTOS, R.; SOMERHAUSEN, A.; SEIDEL, A.; BOGGIANI, P. Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data Acquisition System (EDAS). **Journal of Hydrology**, v.273, p.103-118, 2003.
- VERÍSSIMO, C.U.V.; SOUZA, A.E.B.A.; RICARDO, J.M.; BARCELOS, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; REIS, M.G. Microclima e espeleoturismo na gruta de Ubajara, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27, Januária. **Anais**. Januária: SBE, 2003. p.1-9. www.cavernas.org.br/anais27cbe/27cbe_232-240.pdf
- VIANA JÚNIOR, O. **Hidroquímica, hidrologia e geoquímica isotópica (O e H) da fácies de percolação vadosa autogênica, caverna Santana, Município de Iporanga, Estado de São Paulo**. 2002. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

Fluxo editorial:

Recebido em: 24.07.2018

Aprovado em: 26.02.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

GEOESPELEOLOGIA DA GRUTA DOS RODRIGUES, IPORANGA (SP)

GEOSPELEOLOGY OF THE RODRIGUES CAVE, IPORANGA (SÃO PAULO STATE, BRAZIL)

Bruno Cirilo Consentino (1); William Sallun Filho (2); Bruno Daniel Lenhare (3)

- (1) GEOKLOCK Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda. São Paulo SP.
(2) Instituto Geológico (IG), Secretária de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo SP.
(3) Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro SP.

Contatos: brunoconsentino498@gmail.com; wfilho@sp.gov.br; brunolenhare@gmail.com.

Resumo

A Gruta dos Rodrigues está localizada no entorno do Parque Estadual Intervales, Iporanga (SP). Está desenvolvida em rochas carbonáticas proterozoicas do Subgrupo Lajeado, localizada geomorfologicamente entre o planalto de Guapiara e Serra de Paranapiacaba, entre as cabeceiras dos rios Paranapanema e Ribeira de Iguape, em altitude de 850m. Possui desenvolvimento de 386m e desnível de 44m segundo mapeamento do GPME. A realocização da caverna situou-a quase acima da Gruta dos Paiva, uma das maiores do estado, ainda sem conexão. Os condutos superiores apresentam morfologia anastomosada em planta (fase de iniciação), desenvolvidos ao longo dos planos de acamamento horizontalizados e possivelmente em ambiente de recarga difusa. As galerias inferiores, mais jovens, estão em ambiente vadoso, originando seções em cânions amplos, cortando o acamamento inclinado, e padrão de condutos retilíneos a sinuosos, ao longo das camadas dobradas. Há abundante presença de espeleotemas comuns e de outros raros como tower coral, flores de gipsita e provavelmente o primeiro registro de ardealita ($\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)(\text{SO}_4)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) em cavernas no Brasil. Além dos espeleotemas existem acúmulos de sedimentos, ossos e conchas. Os trabalhos na Gruta dos Rodrigues ressaltam sua importância, sua vulnerabilidade e esses resultados podem servir de suporte para futura proteção da gruta.

Palavras-Chave: Carste; Gruta dos Rodrigues; Parque Estadual Intervales; geoespeleologia; ardealita.

Abstract

The Rodrigues Cave is located around the Intervales State Park, Iporanga (SP). It is developed in proterozoic carbonate rocks of the Lajeado Subgroup, located geomorphologically between the Guapiara plateau and Serra de Paranapiacaba, between the headwaters of the Paranapanema and Ribeira de Iguape rivers, at an altitude of 850m. It has a 386m development and a 44m depth according to the GPME mapping. The relocation of the cave located it almost above the Paiva Cave, one of the largest in the state, still without connection. The superior galleries present anastomosed morphology in plant (initiation phase), developed along horizontal planes of bedding and possibly in a diffused recharge environment. The lower galleries, younger, are in vadose environment, originating sections in wide canyons, cutting the inclined bedding, and pattern of straight lines to sinuous, along the folded layers. There is abundant presence of common speleothems and other rare ones such as tower coral, gypsum flowers and probably the first record of ardealite ($\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)(\text{SO}_4)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) in caves in Brazil. Besides the speleothems there are accumulations of sediments, bones and shells. The work in the Rodrigues Cave emphasizes its importance, its vulnerability and these results can serve as support for future protection of the cave.

Key-Words: Karst; Rodrigues Cave; Intervales State Park; geoespeleology; ardealite.

1. INTRODUÇÃO

O estudo geoespeleológico envolve a utilização de diversos métodos para possibilitar a caracterização e a compreensão da gênese de uma cavidade.

A Gruta dos Rodrigues (SP-440) é uma caverna desenvolvida em rochas carbonáticas

proterozóicas do Subgrupo Lajeado, situada no entorno do Parque Estadual Intervales, município de Iporanga (SP). Possui desenvolvimento e desnível significativos para esta região, com uma grande variedade de espeleotemas, incluindo alguns raros e de composição mineralógica exótica, fósseis, fatos que impulsionaram este estudo. Além disso, a Gruta dos Rodrigues está na Zona de Amortecimento do

Parque Estadual Intervalles (PEI) em zona definida no plano de manejo desta unidade como “Proteção Integral do Carste” (FURLAN; LEITE, 2008). Apesar deste setor ser em geral pouco susceptível a impactos ambientais por estar situado dentro ou no entorno de Unidades de Conservação, o alto grau de carstificação e a posição topográfica como cabeceiras de drenagens o torna vulnerável (SALLUN FILHO et al., 2010; LENHARE, 2014; LENHARE; SALLUN FILHO, 2019), sendo necessária a proteção da área.

Assim, os objetivos deste trabalho abrangem a geoespeleologia e a espeleogênese da Gruta dos Rodrigues, incluindo a análise estrutural, caracterização das formas e tipos de espeleotemas, análise da morfologia da caverna em planta e dos condutos em perfil. As informações espeleológicas levantadas durante trabalhos de campo, para compreensão da evolução do carste neste setor podem servir de suporte a futuros estudos e programas ambientais na região.

2. METODOLOGIA

O estudo geoespeleológico se iniciou com pesquisas da geologia, geomorfologia e do carste local a fim de entender o contexto em que a gruta está inserida, e para tal foram utilizados dados regionais compilados a partir de trabalhos anteriores.

A Gruta dos Rodrigues (SP-440) situa-se na porção centro-oeste do corpo carbonático mais expressivo da região do Parque Estadual Intervalles (Figura 1). Nesta região ocorrem importantes áreas cársticas, em corpos carbonáticos que se localizam geomorfologicamente entre os planaltos de Guapiara e do Ribeira (Serra de Paranapiacaba), entre as cabeceiras dos rios Paranapanema e Ribeira de Iguape. A Gruta dos Rodrigues encontra-se na Bacia do Rio Bocaina-Lajeado (cabeceiras da Bacia do Rio Ribeira), área de maior desenvolvimento cárstico na região com Sistema Fendão-Fendãozinho, Sistema Bocão-Paiva e grutas da Água Luminosa e Arcão (LENHARE; SALLUN FILHO, 2014).

Após esta etapa inicial, foram realizadas saídas de campo para coleta de dados específicos e detalhados na caverna. Nesta etapa foram levantados os perfis e medidas de elementos estruturais e registro fotográfico dos condutos e depósitos. Todas as entradas da caverna, passíveis de identificação, tiveram suas coordenadas registradas em GPS (zona 22J, Datum SAD69), para georreferenciamento das mesmas e localização regional da caverna. Um correto posicionamento geográfico é importante para o estudo geoespeleológico, para relacionar a caverna com a superfície, base geológica e outras cavernas e feições cársticas.

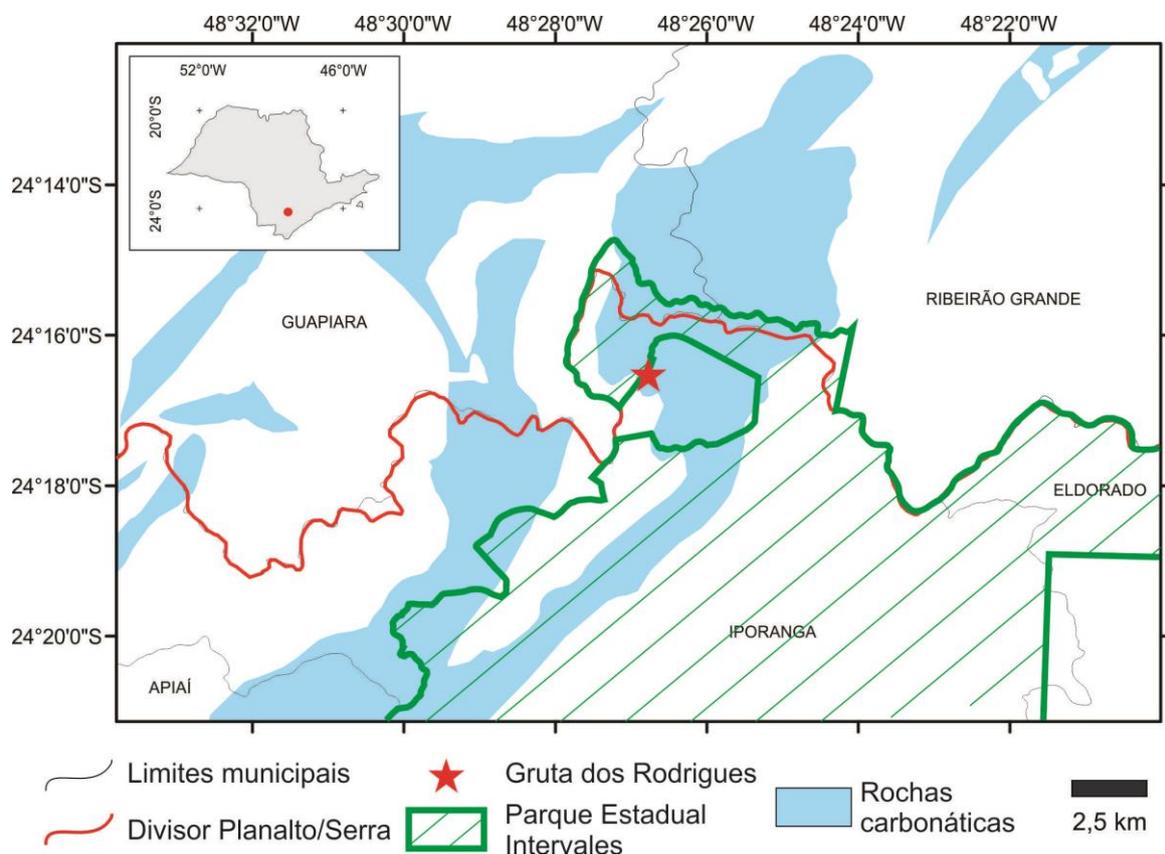


Figura 1: Localização da Gruta dos Rodrigues na cidade de Iporanga, SP.

A caverna foi mapeada pelo Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME, 1999). Complementarmente ao mapa existente, foram confeccionados neste trabalho novos perfis dos condutos, com a utilização de trena a laser e em alguns casos foram confeccionados em gabinete a partir de fotografias. Medidas estruturais de acamamento, falhas e fraturas foram tomadas, estereogramas foram confeccionados, bem como adicionadas ao mapa e aos perfis.

Os espeleotemas e depósitos sedimentares foram caracterizados através de análise *in loco* na caverna, com confecção de desenhos e fotografias. Também foi coletada amostra de espeleotema de mineralogia desconhecida para análise mineralógica por difratometria de raio-X no Laboratório de Caracterização Tecnológica (Escola Politécnica, USP) (autorização CECAV-ICMBIO nº 39843-1).

3. CONTEXTO REGIONAL

Segundo Campanha; Sadowsky (1999) a região do Sudeste do Estado de São Paulo localiza-se no Domínio Apiaí do Cinturão Ribeira. Rochas supracrustais vulcano-sedimentares de baixo a médio grau metamórfico nomeadas de Supergrupo

Açungui constituem o Domínio Apiaí, que está disposto sobre embasamento de gnaisses migmatíticos, núcleos charnockíticos e intercalação de metassedimentos de composição variada (CAMPANHA; SADOWSKY, 1999) (Figura 2). Um padrão complexo de lentes de cisalhamento de várias escalas domina a região (CAMPANHA, 2002) justapondo as rochas do supergrupo Açungui em uma série de cinturões longitudinais de sentido nordeste colocados lateralmente e separados em Domínio norte, central e sul (CAMPANHA; SADOWSKY, 1999) (Figura 2). A Gruta dos Rodrigues está situada no domínio central, no Grupo Votuverava e Subgrupo Lajeado (Figura 2). O Subgrupo Lajeado é composto pela alternância de terrígenos clásticos e carbonáticos, depositados originalmente em plataforma carbonática de mar aberto e possui acamamento dobrado de modo amplo e aberto (CAMPANHA, 1991). O subgrupo é subdividido em sete formações, das quais as formações Bairro da Serra, Mina de Furnas e Passa Vinte são carbonáticas e estão carstificadas na região.

As rochas nesta região foram introduzidas por rochas ígneas subvulcânicas do enxame de diques mesozoicos (CAMPANHA, 2002) (Figura 2).

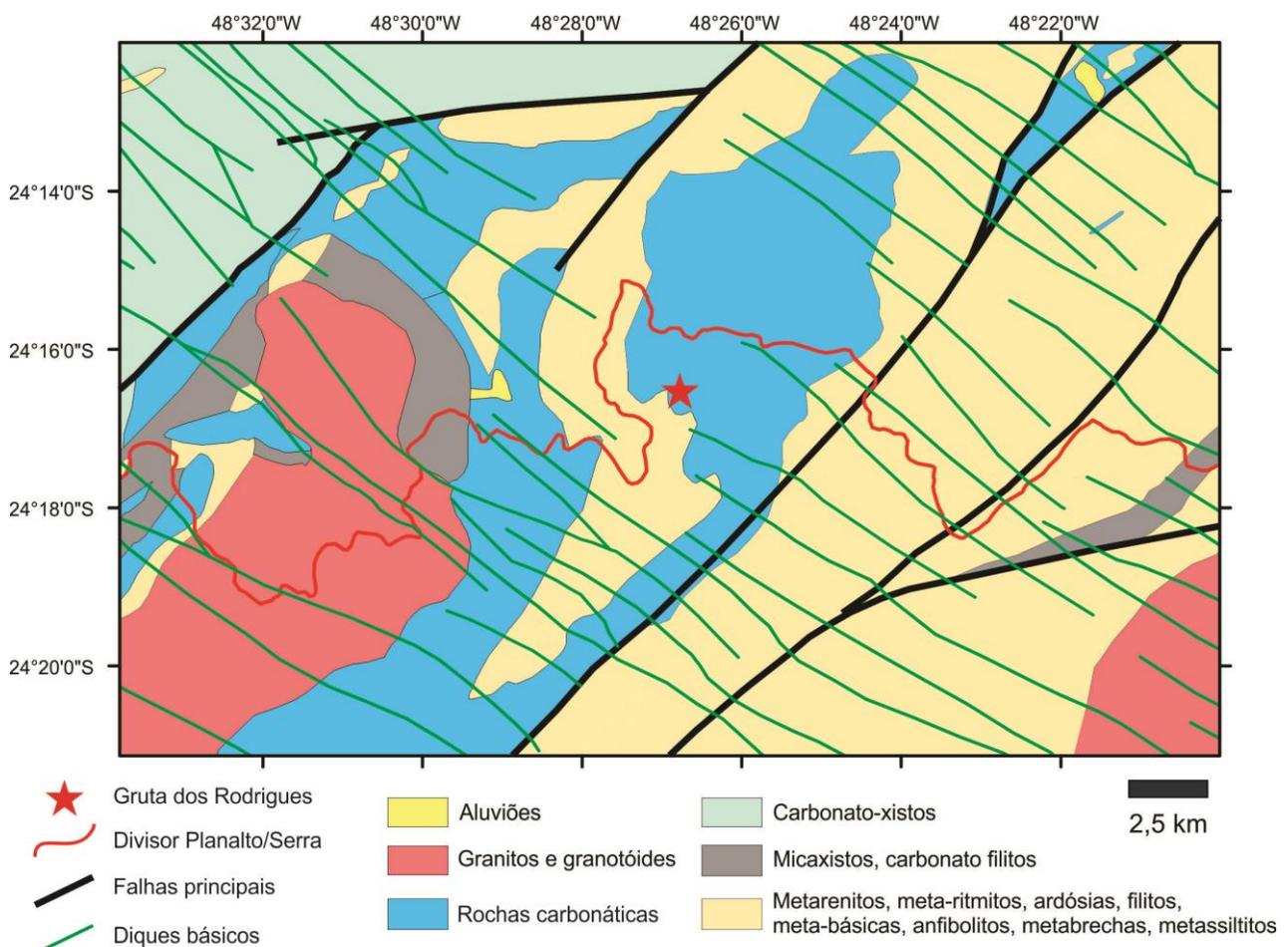


Figura 2: Mapa geológico da região adaptado de Campanha (2002).

O carste da região está contido na Província Espeleológica do Vale do Ribeira, caracterizada por apresentar feições cársticas típicas, como cavernas, paredões rochosos, dolinas, sumidouros, depressões poligonais, cones e torres cársticas (KARMANN; SANCHEZ, 1979, 1986). Esta região se caracteriza pelas altitudes mais elevadas e por se situar em um grande divisor de águas, entre as bacias dos rios Paranapanema (Planalto de Guapiara) a norte e Ribeira a sul. A superfície carbonática é rebaixada em relação às rochas não carbonáticas, condicionando sistemas cársticos de recarga mista, com predomínio de injeção alóctone, com carste poligonal e trechos fluviocársticos (KARMANN, 1994). A caverna localiza-se no compartimento geomorfológico denominado Planalto do Ribeira/Turvo, esta unidade está situada no sul do Estado de São Paulo, limitando-se a sudeste com a Serra do Mar e a norte e noroeste com o Planalto do Guapiara (ROSS; MOROZ, 1997). Segundo Ross; Moroz (1997) as altimetrias nesta unidade variam de 200 a 800m e as declividades predominantes oscilam entre 20 a 40%, predominando formas de relevo denudacionais constituídos de morros altos com topos aguçados e topos convexos, entalhamento dos vales variando entre 20m e 80m e dimensão interfluvial entre 750 até 1750m.

Lenhare; Sallun Filho (2014) descreveram diferenças entre o carste presente nos dois compartimentos, sendo o desenvolvimento do sistema cárstico mais expressivo na Bacia do Rio Ribeira (Planalto do Ribeira/Turvo) devido a sua topografia mais acidentada, altos gradientes hidráulicos e regime fluviocárstico, comparativamente com a região do Planalto de Guapiara, que possui relevo mais suavizado, baixo gradiente hidráulico, com regime hídrico predominantemente fluvial, apresentando sistema cárstico com feições pouco desenvolvidas e mais dispersas. A Gruta do Rodrigues está na bacia do Rio Bocaina-Lajeado, que segundo Lenhare; Sallun Filho (2014) representa um dos principais agentes de desenvolvimento das cavernas mais expressivas da área de estudo, como as grutas do Sistema Fendão-Fendãozinho, Sistema Bocão-Paiva e finalmente a Gruta da Água Luminosa e Arcão, com desenvolvimentos quilométricos (LENHARE; SALLUN FILHO, 2015) (Figura 3). Estas cavernas apresentam corpos d'água em formas de rios, que adentram ao sistema cárstico em sumidouros, percorrendo as cavernas e reaparecendo em

superfície novamente (LENHARE; SALLUN FILHO, 2015), não adentrando ao sistema cárstico em profundidade (LENHARE; SALLUN FILHO, 2014).

Ainda, Lenhare; Sallun Filho (2019) demonstraram que o carste na área onde se insere a caverna estudada apresenta alta vulnebirabilidade, utilizando o método EPIK, mas por outro lado apresenta-se pouco alteradas por processos antrópicos, pelo método KDI.

4. RESULTADOS

4.1 Morfologia da caverna

A Gruta dos Rodrigues possui 386 metros de desenvolvimento e 44 metros de desnível segundo mapeamento do Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME, 1999) e tem uma grande variedade de espeleotemas, alguns raros e de composição mineralógica exótica. O desenvolvimento e o desnível são expressivos para a região. Está situada nas cabeceiras do Rio Pilões, Bacia do Rio Ribeira de Iguape, na cota aproximada de 850m (Figura 3).

A caverna possui três entradas conhecidas e denominadas de 1, 2 e 3 (Figura 4), com coordenadas da Entrada 1 7313018N / 759368E, Entrada 2 7312970N / 759457E e Entrada 3 7312965N / 759451E.

Analisando a morfologia da caverna em planta percebe-se que há três setores com morfologia bastante distinta (Figura 4). O “setor nordeste” (denominado Galeria “Sardinha” no mapa do GPME) situa-se em níveis superiores, com morfologia anastomosada em planta, tendo condutos em direções variadas. O segundo setor, chamado de “central”, tem morfologia retilínea formada por um salão e um conduto de direção WNW-ESE. O terceiro setor, “oeste”, também possui morfologia retilínea, formado por um extenso conduto de direção NE-SW.

Os condutos do setor nordeste, próximos as entradas 2 e 3 possuem galerias de perfil com teto arredondado típico de iniciação freática e cânions sinuosos, seguindo planos de acamamento mais horizontalizados e grandes depósitos areno-argilosos no chão (Figura 5, perfis A a D). Neste setor da caverna predomina o padrão anastomosado em planta, o que sugere uma recarga inicial difusa.

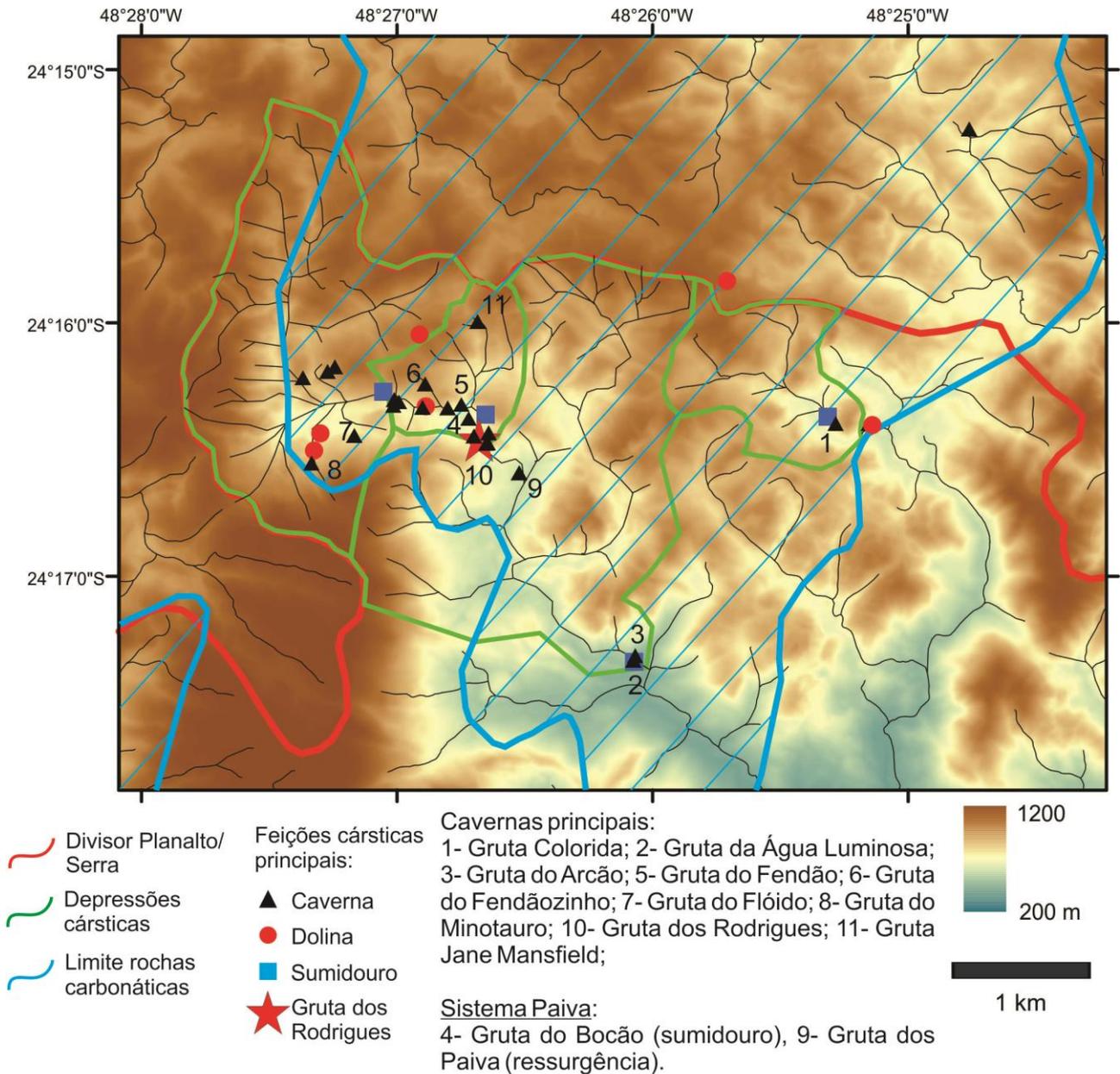


Figura 3: Carste local com hipsometria, drenagens, cavernas da região (adaptado de LENHARE; SALLUN FILHO, 2014).

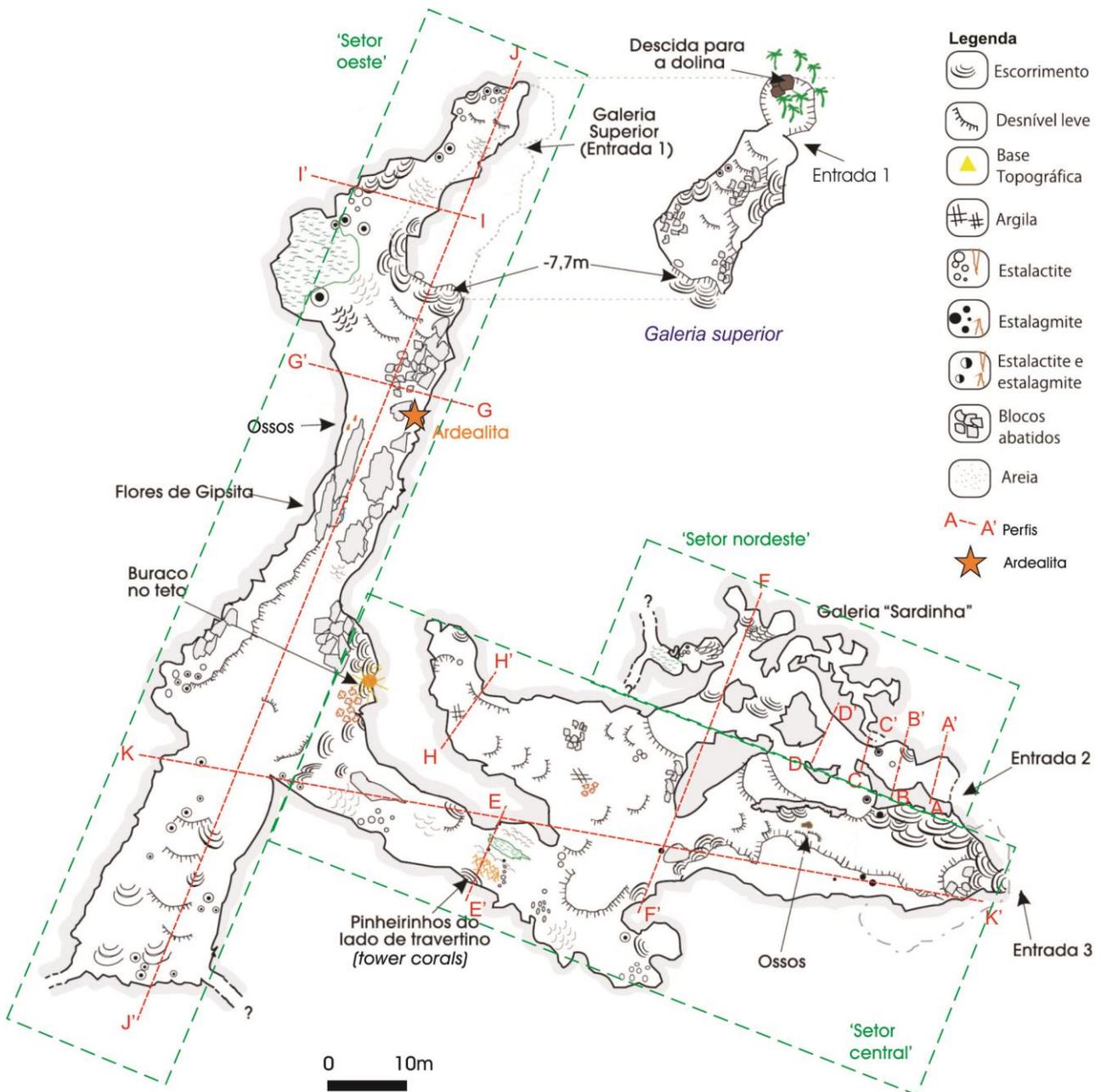


Figura 4: Mapa da caverna, adaptado de GMPE (1999) com perfis, setores e ponto de ocorrência de ardealita.

Do setor nordeste para o setor central ocorre transição entre os níveis superior e inferior da caverna. Tal transição é evidenciada pelo perfil F-F', que possui claro formato “buraco de fechadura”, se iniciando no setor nordeste e terminando na forma de um cânion retilíneo em planta que dá origem ao nível inferior do setor central (Figura 6, Perfil F).

Nos setores central e oeste as galerias inferiores, mais jovens, a fase de desenvolvimento se deu em ambiente vadoso, formando cânions quase verticais em perfil, cortando o acamamento inclinado, e de morfologia retilínea em planta (Figura 6, perfis F a I). Este conduto vadoso é segmentado por seção em teto baixo e preenchimento de espeleotemas na região do Perfil E

(Figura 5, Perfil E). Em corte longitudinal é possível observar bem a morfologia e as dimensões destes cânions (Figura 7, perfis J e K). Esta fase vadosa deve estar associada à instalação do sumidouro do Córrego Lajeado, que hoje está em situação topográfica inferior, no sumidouro da Gruta dos Paiva (entrada “Bocão”). Na parte mais inferior da caverna, na porção SW do setor oeste, mais abaixo que o piso do cânion da galeria principal deste setor, uma grande fenda inclinada se desenvolveu para sudoeste em direção à Gruta dos Paiva, ao longo do acamamento inclinado, podendo representar escoamento vadoso local que conectava a Gruta dos Paiva após a instalação do sumidouro desta última (Figura 7, Perfil J e K).

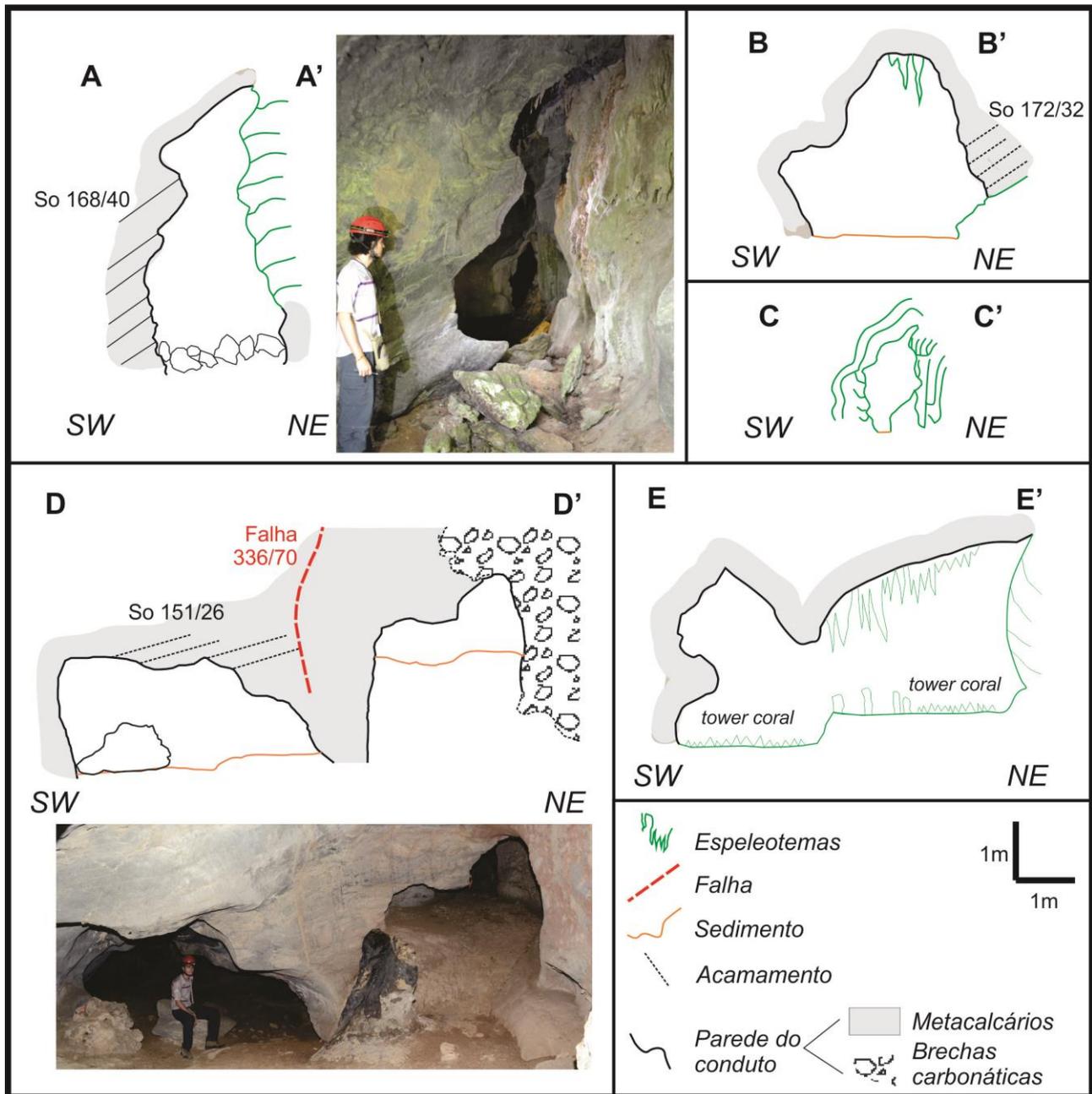


Figura 5: Perfis e fotos de condutos da caverna. A- conduto em forma de cânion sinuoso próximo a entrada 2; B- conduto com teto; C- condutos com teto arredondado, separados por pendant soterrado. Do lado nordeste há brecha tectônica; E- conduto com teto baixo e preenchimento de espeleotemas. No piso represas de travertino com espeleotemas tipo *tower coral*.

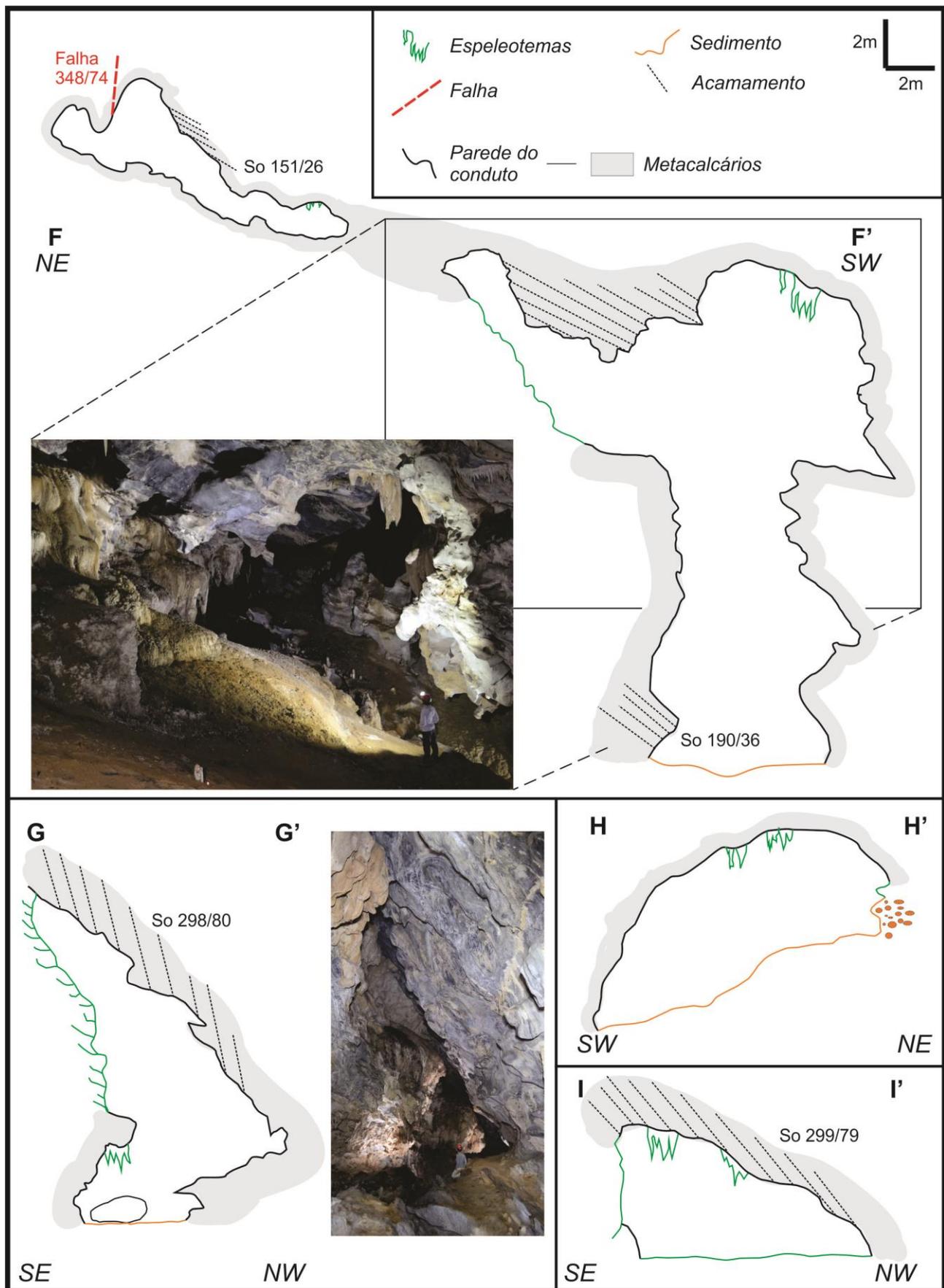


Figura 6: Perfis e fotos de condutos da caverna. F- perfil composto de duas galerias, no setor central, com galerias superior de morfologia anastomosada, que grada para cânion vadoso retilíneo na porção inferior; G- conduto em cânion inclinado no setor oeste. Na porção SE deste perfil é o local de ocorrência de ardealita; H- conduto com cânion parcialmente preservado e piso com sedimentos; I- conduto com teto baixo e travertinos no piso.

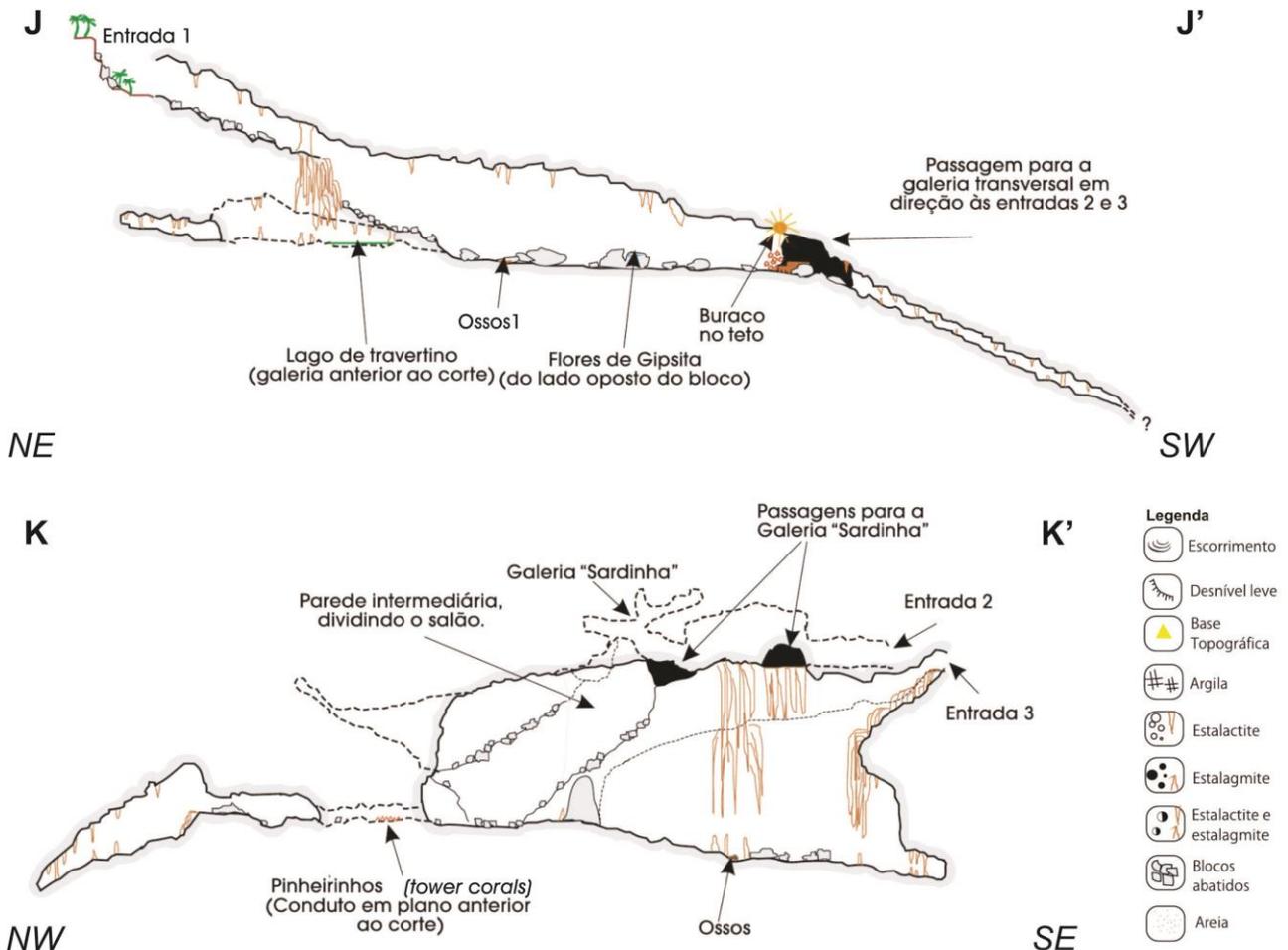


Figura 7: Perfis longitudinais (adaptados de GPME, 1999). J- perfil ao longo da galeria do setor oeste da caverna, onde nota-se na porção NE a entrada 1 superior (abatimento em dolina de colapso), o cânion da galeria na porção mediana do perfil e uma galeria inclinada na porção SW, em direção a Gruta dos Paiva; K- perfil ao longo das galeria do setor central e parte do setor oeste. Ao fundo os condutos superiores anastomosados do setor nordeste e em primeiro plano os cânions do setor central e parte do início da galeria inclinada em direção a Gruta dos Paiva.

4.2 Aspectos litológicos e estruturais

A rocha da Gruta dos Rodrigues se trata de um metacalcário de coloração cinza clara, ocasionalmente negro, calcítico, com estruturas de acamamento visíveis e inclinadas, quando não modificadas por dobras locais e falhas. A granulação da rocha calcária varia entre calcilutitos e calcarenitos. Ocorrem também brechas carbonáticas tectônicas (p.ex. Figura 5, perfil D).

A gruta possui condicionamento estrutural evidente (acamamento) na direção dos condutos dos setores central e oeste (Figura 8). O conduto retilíneo do setor oeste se inicia na entrada 1 e segue em planta a direção de acamamento média, medida ao longo desse setor (azimute 201), e em perfil o entalhamento acompanha aproximadamente direção do mergulho. A direção do conduto também coincide com uma direção de fratura, mostrando a

infiltração da água preferencialmente no contato entre direção de acamamento e fratura, originando um conduto grande e uniforme na sua direção. A zona oeste, entretanto, se diferencia da direção dos acamamentos medidos nos demais setores da caverna, variação interpretada como causada por uma dobra, uma anticlinal com eixo de direção 218/24 (Figuras 8 e 9).

O maior salão da caverna se encontra no setor central e sua continuação é um conduto retilíneo de direção WNW-ESE, que segue a direção de acamamento nesse lado da gruta. Os demais condutos menores do setor nordeste têm orientações parecidas com as direções de acamamento e mergulho do acamamento medidas nessa parte da caverna, dissolvendo porém menos calcário e formando também condutos menores e menos uniformes.

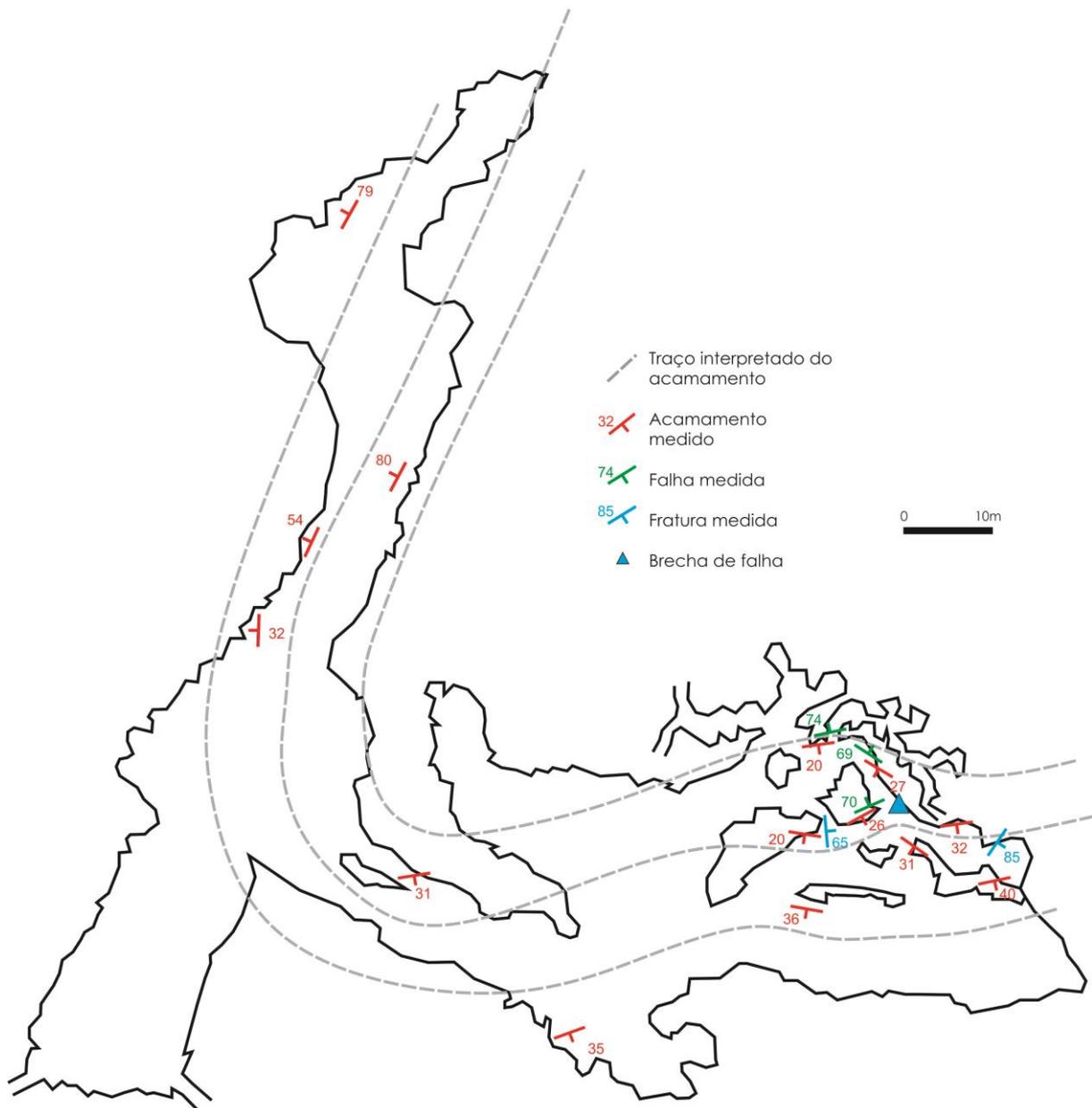


Figura 8. Mapa com medidas estruturais da caverna e traços do acamamento interpretados.

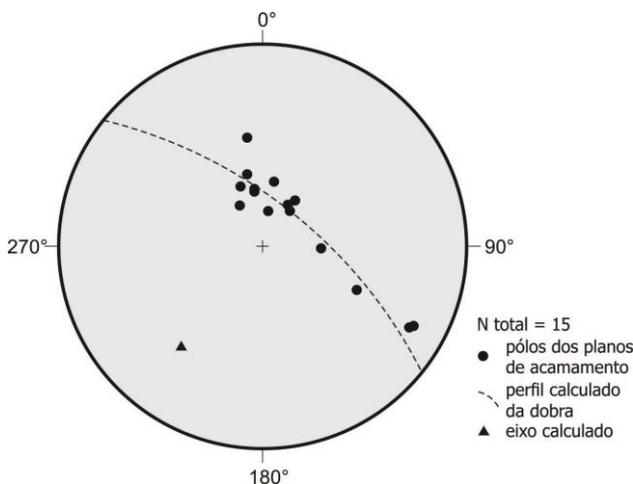


Figura 9: Estereograma da Gruta dos Rodrigues com os pólos do acamamento dos metacalcários, o círculo máximo calculado do perfil da dobra e o eixo calculado da dobra.

4.3 Depósitos sedimentares e espeleotemas

Uma grande variedade de espeleotemas foi encontrada na Gruta dos Rodrigues, dentre os quais alguns comuns como travertinos, cortinas, escorrimento, coralóides estalagmites, estalactites, pérolas, helictites, flores de gipsita e coralóides.

Dentro de algumas represas de travertino foram encontrados espeleotemas subaquáticos em abundância na qual denominamos de “pinheirinhos” (Figura 10). Estes espeleotemas são denominados *tower coral*, e são pequenos cones subaquáticos de forma não arredondada (HILL; FORTI, 1997). Martini (1987) se referiu a estes espeleotemas como “florestas em miniatura” em cavernas da África do Sul, cuja a gênese foi atribuída como subaérea e subaquática, porém neste caso tem constituição mais fina e delicada. Também já foram denominados de

“100.000 soldados” (HILL; FORTI, 1997). Notou-se que os travertinos em que se encontravam estes “pinheirinhos” estavam secos na estação mais seca (abril) (Figura 10A e C). Já na estação mais úmida (dezembro), após período de chuvas, percebeu-se que os travertinos estavam cheio de água com os “pinheirinhos” submersos, ou seja, ainda estão em formação (Figura 10B). Alguns conjuntos formam alinhamentos, devido a gotajamentos alinhados do teto (Figuras 10C, 11A). No geral são centimétricos e possuem forma cônica, pontiaguda e ereta (Figura 11B).

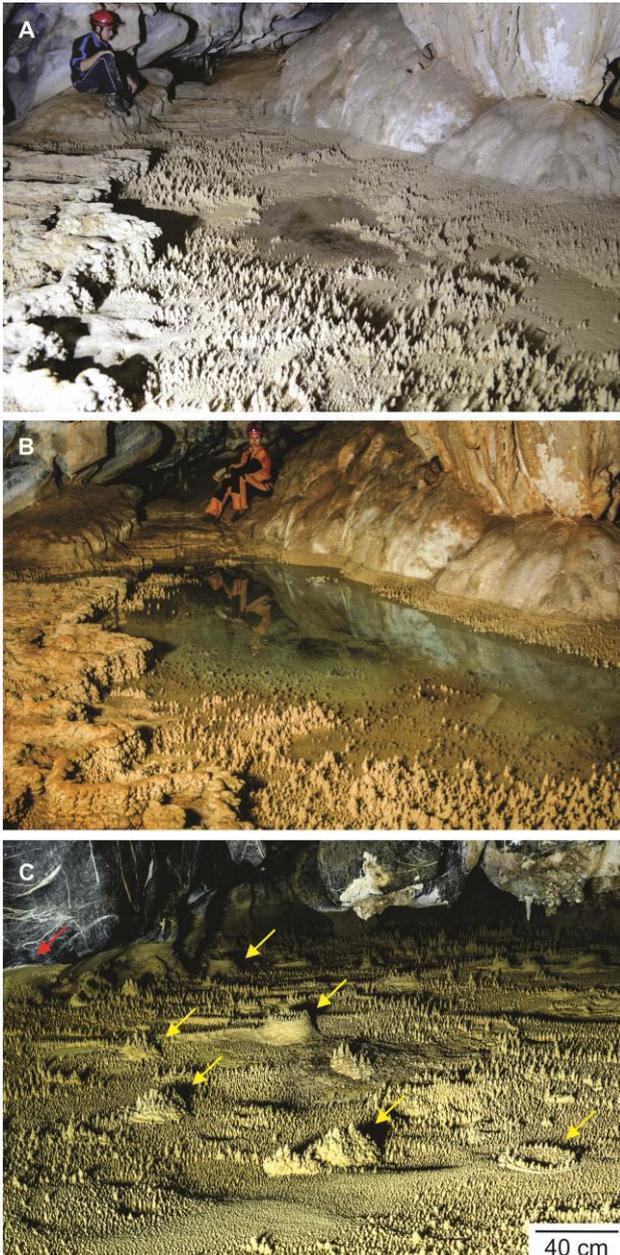


Figura 10: Espeleotemas subaquáticos “pinheirinhos” (*tower coral*): A- em travertinos secos (estação seca); B- no mesmo travertino, porém cheio de água (estação chuvosa); C- pequenos cones ou vulcões subaquáticos (setas amarelas) no fundo da represa, crescendo em associação com os *tower corals*, e ao fundo, marca do nível da água da represa de travertino, dada por crosta calcífica subaquática (seta vermelha).

Flores de gipsita foram observadas especialmente no conduto inferior do setor oeste da caverna, em fraturas de paredes inclinadas, em trecho onde o calcário encontra-se bastante deformado e fraturado, com níveis de material siliciclástico alterado.

Ainda no setor oeste, próximo às flores de gipsita, foram encontrados coralóides (Figura 12A) e depósitos pulverulentos (pó fino) (Figura 12B), de cor amarelada e formado sobre guano no piso, em uma área de cerca de 4m². Posteriormente, este material teve mineralogia identificada por difração de raios-X como ardealita, um fosfato hidratado de cálcio de fórmula química $Ca_2(HPO_4)(SO_4) \cdot 4H_2O$, mineral formado da interação de calcita com guano (FROST et al., 2011). A ardealita encontra-se associada com gipsita, calcita e sulfato de cálcio hidratado ($Ca(SO_4) \cdot 0,5 H_2O$).

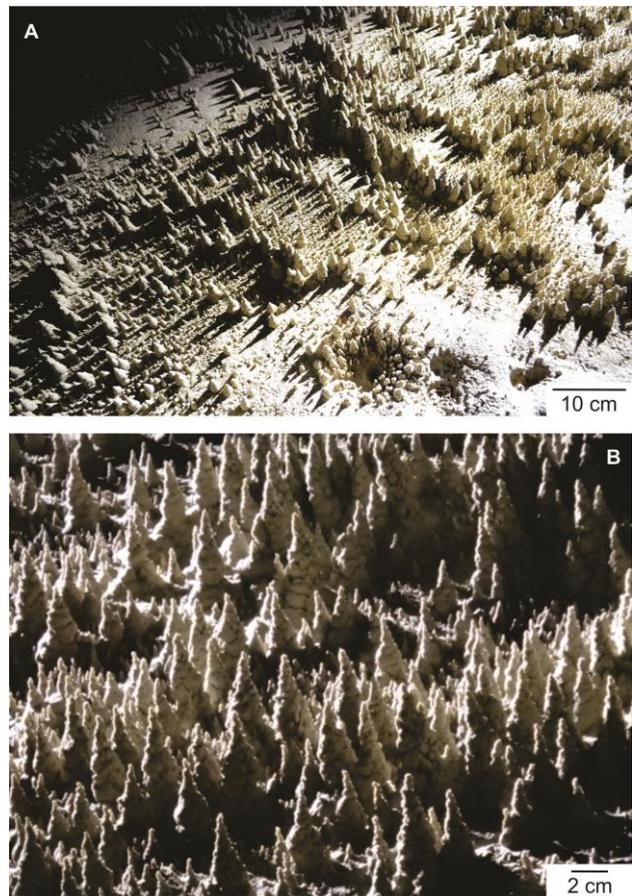


Figura 11: Detalhes dos espeleotemas subaquáticos “pinheirinhos” (*tower coral*) em travertino seco (mesmo da Figura 10): A- Visão de um conjunto, no fundo da represa de travertino, onde se nota concentrações e alinhamentos entre si; B- Vista lateral da morfologia cônica, pontiaguda e ereta. Foto B: Ericson Cernawsky Igual.

No setor nordeste superior parte dos condutos são preenchidos por sedimentos areno-argilosos. Na rampa que conecta os níveis superiores do setor

nordeste com os inferiores do setor central há conglomerado com clastos de quartzo e diabásio com esfoliação esferoidal e mais de 15 centímetros de diâmetro em matriz areno-argilosa. Na mesma região, a sobreposição de camadas de crosta carbonática ao longo dos anos dá origem a depósitos estratificados, que cobrem o conglomerado. Nos condutos dos setores nordeste e central, o piso é recoberto por sedimentos, sem precisão da espessura, além de crostas de calcita, travertinos, coralóides e pérolas.

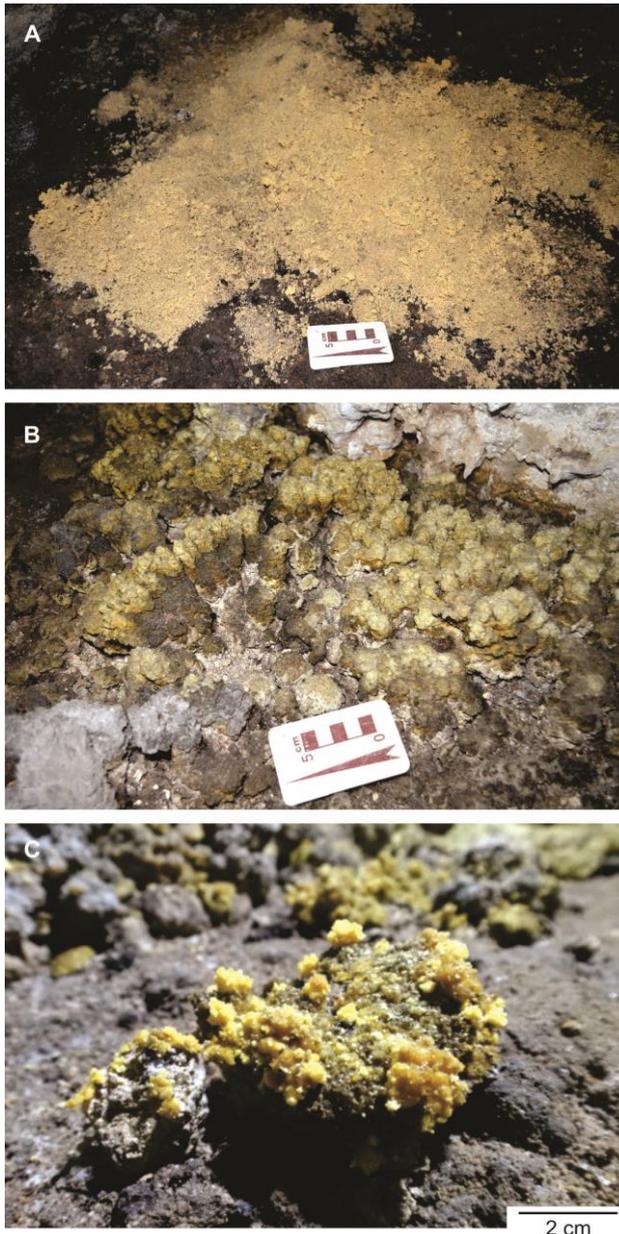


Figura 12: Ardealita pulverulenta (A) e em forma de coralóides (B, C). Foto C: Ericson Cernawsky Igual.

Foram observados também vários ossos, posteriormente identificados como ossos de mamíferos, anfíbios, fragmentos ósseos de táxons não identificados e conchas de gastrópodes íntegras e fragmentadas (JESUS et al., 2016). Alguns

bioclastos estavam incrustados de calcita e sedimento lamoso numa mistura temporal que ocorre até atualmente. Tal mistura provavelmente se deve à proximidade com a boca (entrada 1) da caverna, com ação de água pluvial depositando novos sedimentos externos à caverna e retrabalhando sedimentos antigos (JESUS et al., 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espeleogênese depende da combinação de diversos fatores geológicos, químicos e hidrológicos (PALMER, 2007) de modo que para a investigação e estudo da gênese e desenvolvimento de uma caverna, múltiplos dados são necessários. Neste trabalho foi possível analisar a gruta de diversos modos: do ponto de vista geológico, estrutural, morfológico, genético e espeleológico.

A análise morfológica dos perfis transversais e longitudinais da caverna permite descrever duas etapas principais de formação. A evolução se dá com uma etapa de abertura com iniciação freática dos condutos, evidenciada pela forma arredondada do topo dos condutos do setor nordeste da caverna e níveis mais altos do setor central, seguida de uma etapa de paragênese, com entupimento dos condutos dos níveis superiores por sedimentos, evidenciado por depósito sedimentar argilo-arenoso e conglomerático. A terceira fase de desenvolvimento da gruta se deu com o entalhamento vadoso, formando seções transversais do tipo “buraco de fechadura” e seções do tipo cânion. A iniciação freática da caverna pode ter acontecido próximo as entradas 2 e 3, com posterior entalhamento vadoso indicando fluxo subterrâneo em três direções distintas: a primeira seguindo a direção do mergulho do acamamento (SW) na parte nordeste e central da caverna após iniciação freática, a segunda na direção NW se conectando ao conduto principal após o salão dos pinheirinhos e a terceira na direção SW dando origem ao maior e mais uniforme conduto da caverna, no setor oeste. Conglomerado com seixos centimétricos arredondados de diabásio e depósitos areno-argilosos espessos no setor nordeste indicam paleofluxo com alta capacidade de transporte, o que não ocorre atualmente, sendo que a gruta recebe apenas recarga pluvial. Entretanto, a formação de espeleotemas, inclusive os subaquáticos, ainda é ativa.

A caverna desenvolveu-se controlada por estruturas geológicas, tais como dobra, fraturas e acamamento que juntas comandaram as direções principais de abertura de condutos: SW-NE no lado oeste controlada pelo encontro da direção de acamamento com direção de fratura e entalhando

condutos inclinados de acordo com a direção e ângulo de mergulho e NW-SE a zona central da caverna, controlada principalmente pela direção e mergulho do acamamento, que difere do lado oeste, pois o acamamento está dobrado. Analisando estruturalmente as medidas de acamamento foi verificado uma dobra anticlinal, cujo eixo inclinado tem direção SW-NE e mergulho para SW, onde o conduto principal segue a mesma direção de acamamento do flanco NW, e o conduto secundário, ramificado em diversos condutos menores, se alinha com o mergulho e direção de acamamento do flanco SE, tendo sua gênese diretamente relacionada com os planos de acamamento desse flanco.

A caverna se encontra agora acima do nível d'água, contando apenas com recarga autogênica de percolação vadosa pelo teto.

A proximidade da Gruta dos Rodrigues com a Caverna dos Paiva e semelhanças como mesma direção de condutos e tipos de espeleotemas sugerem que ambas podem fazer parte de um mesmo sistema, ainda sem passagens penetráveis conhecidas, mas que juntas possuiriam mais de 4km de desenvolvimento horizontal. Quando ocorrerem novos mapeamentos de ambas as grutas será possível observar se há ou não correlação entre níveis, ou seja, se elas foram formadas concomitantemente ou se a Gruta dos Rodrigues representa os estágios iniciais do sistema, como postulado neste trabalho.

Dentre os espeleotemas observados, dois chamam atenção devido a sua raridade nas cavernas da região: os *tower corals* (pinheirinhos) e os depósitos de ardealita. Hill; Forti (1997) colocam que a gênese dos tower corals ocorre em piscinas rasas onde evaporação torna a área próxima à superfície levemente mais saturada em calcita que o fundo, ocasionando maior precipitação no topo do coralóide, favorecendo seu crescimento vertical.

Minerais do grupo do fosfato estão presentes amplamente em caverna sempre que uma caverna contém guano fresco ou fóssil ou depósitos de ossos, e dependendo função da água que percola pelo guano, reage com rochas carbonatadas ou minerais argilosos, os fosfatos ricos em Ca ou Mg e ricos em Al serão formados pela alteração destes materiais (ONAC; VEREŞ 2003). A importância da matéria orgânica (guano, restos de esqueletos e ácidos derivados de solo lixiviado) para o estudo de minerais de caverna não reside apenas na sua habilidade de “emprestar” compostos químicos que são escassos ou inexistentes em cavernas carbonáticas, mas também nas reações químicas que ela gera. A decomposição de carcaças de vertebrados e guano nas cavernas libera P (fósforo) e

N (nitrogênio), elementos químicos que fazem parte de uma grande variedade de minerais, alguns apenas encontrados em cavernas (HILL; FORTI 1997, ONAC; FORTI 2011).

Essas interações podem estar associadas a fatores ambientais (ex. umidade); condições físico-químicas (presença ou falta de certos cátions, pH, etc) dentro da caverna e nos horizontes ricos em guano e presença de outros minerais, pois uma fase mineral pode se transformar em outra quando condições mudam (HILL; FORTI 1997). A ardealita foi descrita como uma espécie mineral por Schlader (1934) na Caverna Cioclovina na região da Transilvânia, Romênia, e seu nome deriva de *Ardeal* que significa Transilvânia em Romeno. As associações de fosfatos ricos em cálcio em cavernas, tais como hidroxiapatita, bruxita, monetita e ardealita, residem em um suporte de carbonato, implicando que eles são produtos de reação entre carbonato e soluções ácidas derivadas de guano (MARINCEA et al. 2004, FROST et al. 2011, ONAC; VEREŞ 2003, HILL; FORTI 1997). Em pH mais elevado a hidroxiapatita é o único fosfato a se formar, enquanto valores de pH de até 5,5 desestabilizam a bruxita e a hidroxiapatita, favorecendo a formação de ardealita, se S estiver disponível (MARINCEA et al. 2004). A solução rica em fosfato emerge do guano com proporções diversas de sedimentos carbonáticos e argilosos e produz uma auréola de fosfato ao redor do guano (ONAC; VEREŞ 2003). Estudos sobre a ardealita realizados na caverna de Liliacilor (Romênia), identificada junto a bruxita, hidroxiapatita e gipsita, mostram sua ocorrência em condições 11 e 34% de umidade e numa faixa de pH entre 5.7 e 6.6 (PUŞCAŞ et al. 2014).

Na Gruta dos Rodrigues, o depósito de ardealita é pequeno, não ocupando mais que uma área de 4m², mas indica condições favoráveis para formação deste mineral, principalmente a grande quantidade de guano depositada no local, a presença de ossos e a calcita do embasamento. Possivelmente as condições locais de pH, umidade e química das águas percoladas também favoreceram a formação deste mineral. Porém estudos específicos a este respeito não foram conduzidos, e seriam possibilidades interessantes para trabalhos futuros. Apesar da ardealita ser considerada um mineral relativamente comum no mundo (HILL; FORTI, 1997), não foram encontradas referências a sua ocorrência no Brasil. Assim acreditamos que a ocorrência na Gruta dos Rodrigues se trata do primeiro registro de ardealita em cavernas no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo apoio na forma de Auxílio à Pesquisa (W. Sallun Filho, proc. 12/05632-2), bolsa de mestrado (B.D. Lenhare, proc. 12/01424-6) e bolsa de iniciação científica (B.C. Consentino, proc. 13/07541-7). Ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (W. Sallun Filho, 2012-2018). Aos

colegas do GMPE, pelo mapa da Gruta dos Rodrigues e apoio em campo. Ao Parque Estadual Intervales e seus funcionários pelo apoio a esse estudo. Aos colegas Beatriz H. Boggiani, Bruna B. Myraia, Luis H. S. Almeida, Natalia A. Santiago e José Flóido pelo apoio em campo. Ao CECAV pela autorização das coletas.

REFERÊNCIAS

- CAMPANHA, G.A.C. **Tectônica proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná**. 1991. 296p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- CAMPANHA, G.A.C. **O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira**. 2002. 105p. Tese (Livre-Docência Livre-Docência junto ao Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- CAMPANHA, G.A.C.; SADOWSKI, G.R. Tectonics of the Southern Portion of the Ribeira Belt (Apiá Domain). **Precambrian Research**, v.98, n.1-2, p.31-51, 1999.
- FROST, R.L.; PALMER, S.J.; HENRY, D.A.; POGSON, R. A Raman spectroscopic study of the 'cave' mineral ardealite $\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)(\text{SO}_4)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$. **Journal of Raman Spectroscopy**, v.42, n.6, p.1447-1454, 2011.
- FURLAN, S.A., LEITE, S.A. (Coords.) Plano de manejo do Parque Estadual Intervales. Disponível em: fflorestal.sp.gov.br/pagina-inicial/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-pe-intervalos/. Acesso em: 18 mar. 2019.
- GMPE – Grupo Pierre Martin de Espeleologia. **Mapa da Gruta dos Rodrigues**. São Paulo: GPME, 1999. 1 mapa.
- HILL, C.; FORTI, P. **Cave Minerals of the World**. Huntsville, AL, EUA: National Speleological Society, 1997. 463 p.
- JESUS, J.F.M.; DIAS, W.A.F.; PEIXOTO, B.C.P.M.; BUCK, P.V.; NASCIMENTO, C.S.I.; IGUAL, E.C.; LENHARE, B.D.; MARINHO, M.A.; FERNANDES, M.A. Mistura temporal em depósitos cársticos do Parque Estadual Intervales, Estado de São Paulo: Implicações para o registro fossilífero. In: Grillo, O.N.; Romano, P.S.R.; Oliveira, G.R. (Eds.) SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA DE VERTEBRADOS, X, 2016, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos**. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. p.93.
- KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo**. 1994. 241p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Espeleo-Tema**, n.13, p.105-167, 1979. Disponível em: www.cavernas.org.br/espeleo-tema/Espeleo-Tema_v13_105-167.pdf.
- KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L.E. Speleological Provinces in Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9, 1986, Barcelona. **Comunicaciones**. p.151-153.
- LENHARE, B. D. **Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio Paranapanema) e do rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape) na região do Parque Estadual Intervales (PEI), estado de São Paulo**. 2014. 99p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- LENHARE, B. D.; SALLUN FILHO, W. O carste nas cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Paranapanema) e do Rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape), SP. **Geociências**, v.33, p.686-700, 2014.

- LENHARE, B.D.; SALLUN FILHO, W. Diferenças espeleométricas entre as cavernas do Planalto de Guapiara e Serra de Paranapiacaba, na região do Parque Estadual Intervales (PEI), estado de São Paulo. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (Orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015, Eldorado. **Anais**. Campinas: SBE, 2015. p.495-503. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_495-503.pdf.
- LENHARE, B. D.; SALLUN FILHO, W. Application of EPIK and KDI methods for identification and evaluation of karst vulnerability at Intervales State Park and surrounding region (Southeastern Brazil). **Carbonates and Evaporites**, v.34, n.1, p.175-187, 2019.
- MARINCEA, Ș.; DUMITRAȘ, D. G.; DIACONU, G.; BILAL, E. Hydroxylapatite, brushite and ardealite in the bat guano deposit from Peștera Mare de la Merești, Perșani Mountains, Romania. **Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte**, n.10, p.464-488, 2004.
- MARTINI, J.E.J. The miniature forest in Cango III and its implications for the understanding of speleogenesis. **South African Speleological Association Bulletin**, v.28, p.7-10, 1987.
- ONAC, B.P.; FORTI, P. State of the art and challenges in cave minerals studies. **Studia UBB Geologia**, v.56, n.1, p.33-42, 2011.
- ONAC, B.P.; VEREȘ, D.Ș. Sequence of secondary phosphates deposition in a karst environment: evidence from Magurici Cave (Romania). **European Journal of Mineralogy**, v.15, n.4, p.741-745, 2003.
- PALMER, A.N. **Cave Geology**. Dayton, OH, EUA: Cave books, 2007. 454p.
- PUȘCAȘ, C.M.; KRISTALY, F.; STREMTAN, C.C.; ONAC, B.P.; EFFENBERGER, H.S. Stability of cave phosphates: Case study from Liliecilor Cave (Trascău Mountains, Romania). **Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry**, v.191, n.2, p.157-168, 2014.
- ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000**. São Paulo: Departamento de Geografia-FFLCH-USP/IPT/FAPESP, 1997. 64 p.
- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, J.A.; HIRUMA, S.T.; SALLUN, A.E.M.; KARMANN, I. O carste no plano de manejo do Parque Estadual Intervales e zona de amortecimento, Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Escola de Minas**, v.63, n.3, p.441-448, 2010.
- SCHADLER, J. Ardealit, ein neues Mineral $\text{CaHPO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$. **Zentralblatt für Mineralogie**, Abt. A., p.40-41, 1932.

Fluxo editorial:

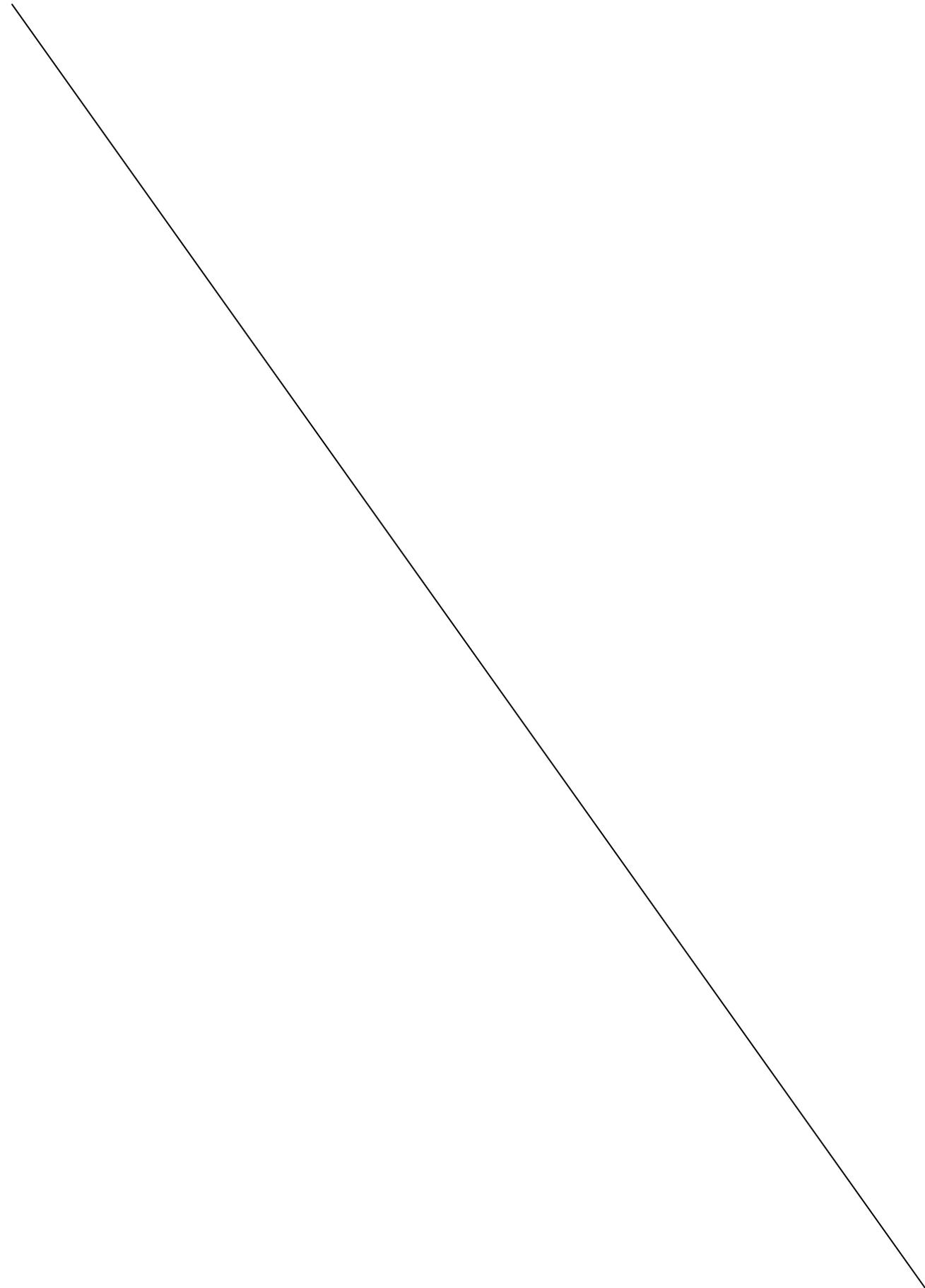
Recebido em: 05.04.2019

Aprovado em: 16.09.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



LAND USE ANALYSIS IN KARST REGIONS OF SOUTHEASTERN SÃO PAULO STATE

ANÁLISE DE USO E OCUPAÇÃO EM ÁREAS CÁRSTICAS DO SUDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Bruno Daniel Lenhare (1); William Sallun Filho (2); César Augusto Moreira (1)

(1) Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro.

(2) Instituto Geológico (IG), Secretária de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo SP.

Contatos: brunolenhare@gmail.com; wfilho@sp.gov.br; moreiraca@rc.unesp.br.

Abstract

The Remote Sensing and Geographic Information System - GIS are tools that assist in the planning, use and human occupation of sensitive areas like karst terrain. The region between the Guapiara Plateau and Paranapiacaba Range, south of the state of São Paulo presents this geological context that are under constant pressure of the anthropic advancement of several kind of natures, such as mining of carbonate rocks, forestry, agriculture and human occupation itself, inputting a risk to both human lives and preservation of karst systems. The preparation of the map of use and land cover of the area of study is one of the necessary databases themes to be used for land use planning. This work presents the association of remote sensing techniques and the use of GIS information analysis of the use and land cover during the years 2001, 2010 and 2014, through images Landsat 7. Thus, it was possible to map the main land uses in the area, highlighting a wide variability particularly in the Guapiara Plateau. The results demonstrate the advantages of the use of geotechnology in identifying environmental areas of high sensitivity and the possibility of regional planning or establishment of growth vectors towards areas of lower environmental impact.

Key-Words: Territorial planning; temporal analysis; landscape dynamics; karst.

Resumo

O Sensoriamento Remoto e o Sistema de Informações Geográficas – SIG são ferramentas que auxiliam no planejamento, uso e ocupação de áreas sensíveis, como terrenos cársticos. A região compreendida entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba, região sul do Estado de São Paulo, apresenta este contexto geológico, que estão sob constante pressão do avanço antrópico das mais variadas naturezas, como mineração de rochas carbonáticas, silvicultura, agricultura e a própria ocupação humana, colocam em risco tanto vidas humanas quanto a preservação de sistemas cársticos. A elaboração do mapa de uso e cobertura do solo da área de interesse do projeto constitui um dos temas necessários ao banco de dados a ser utilizado para ordenamento territorial. Neste estudo foram adotadas técnicas de sensoriamento remoto e a utilização do SIG, uma análise do uso e cobertura do solo durante os anos de 2001, 2010 e 2014, por meio de imagens LANDSAT 7. Desta forma, foi possível o mapeamento dos principais usos da terra na área, com destaque para uma ampla variabilidade em especial no Planalto de Guapiara. Os resultados demonstram as vantagens do uso das geotecnologias na identificação de áreas de alta sensibilidade ambiental e a possibilidade de ordenamento territorial ou do estabelecimento de vetores de crescimento em sentido às áreas de menor impacto ambiental.

Palavras-Chave: Planejamento territorial; análise temporal; dinâmica de paisagens; carste.

1. INTRODUCTION

Karstic regions are areas highly susceptible to environmental and anthropic impacts and the characterization of this type of environment is fundamental for their preservation and optimization of their use, since many people are dependent on them both for housing and the development of various sectors of the economy (LENHARE, 2014).

The economic interest of Ribeira Valley, southeastern of São Paulo state, Brazil, due to the presence of interest ores, mainly the carbonate rocks, exploited for cement and lime, associated to the rapid economic growth and the demand for new mining areas has an advance in the karstic system in the region before any previous basic studies. The local population is in risk due the uncontrolled

occupation and difficulty of traditional agricultural practices, consequence of the irregular relief, soil and karstic characteristics, as well as mining that can erode soil, silt the rivers and lower the groundwater level (SALLUN FILHO et al., 2010, LENHARE; SALLUN FILHO, 2014).

Careful management of sites of occupation, agriculture, disposal of waste, implementation of mining and even protection areas is a means of managing and even minimizing the risks of subsidence, contamination of groundwater and destruction of natural cavities due to the fragility (WILLIAMS, 1993; VAN BEYNEN et al., 2012).

Remote Sensing is a set of activities that allow to obtain information of objects that make up the terrestrial surface without direct contact with them. These activities involve the detection, acquisition and analysis (interpretation and extraction of information) of electromagnetic energy emitted or reflected by terrestrial objects and recorded by remote sensors. The integration of aero-surveys of magnetometry and gamma-spectrometry can unquestionably accelerate basic geological mapping, as well as provide invaluable tectonic information, mineral potential and land use. This is particularly true and highlighted in areas without infrastructure, covered by dense tropical forests and with great territorial extension, as is the case in some regions of Brazil (CARVALHO JUNIOR et al., 2014).

The use of images of this nature in support of geological investigations has been intensifying rapidly. Both techniques, geophysics and remote sensing, are synergistic in several points, from their sample characteristics, by remote sensors, to their finalist application in geological-structural mapping and in the physical and chemical characterization of rocks and soils. Remote sensing and geoprocessing are very effective and advantageous tools in relation to other data collection and analysis methods since they provide a wide panorama of landscape dynamics (TAURA et al., 2011). These tools allow mapping land use and land cover patterns to assess how each landscape element is related to the other spatially and temporally (VAEZA et al., 2010; TAURA et al., 2011).

Previous works have been demonstrate the effectiveness of this set of procedures to aid in the recognition and design of areas of high environmental vulnerability in karstic systems (CARVALHO JUNIOR et al., 2006; FRISCHBUTTER, 2002; ROSA et al., 2009; CHARIF et al., 2013; DOCTOR et al., 2013; de CARVALHO JUNIOR et al., 2014).

This paper presents a temporal comparison of Landsat 7 images (2001, 2010 and 2014, which were the best free images available), with the use of the MAXVER-ICM classifier, which, like MAXVER, associates the classes at individual points, but has the advantage of considering spatial dependence in the context of the image to be classified (LEITE; ROSA, 2012; NERY et al., 2013). This analysis can help public policies in the territorial ordering of municipalities located in karst regions.

2. LOCATION OF THE STUDY AREA

The study area consists of carbonate rocks located between the basins of the Almas and São José de Guapiara rivers (Paranapanema River Basin - Guapiara Plateau) and Pilões river (Ribeira de Iguape River Basin – Paranapiacaba Range), in the southeast of the State of São Paulo (Figure 1). The region is located in the context of the "Ribeira Valley", characterized by typical karstic features such as caves, rocky walls, sinkholes, polygonal depressions, cones and karst towers (KARMANN; SANCHEZ, 1979; 1986).

The region comprises carbonate bodies of the Subgroup Lajeado (Neoproterozoic), which occur in the form of continuous bodies and geomorphologically are located between Guapiara Plateau and the Coastal Province (PONÇANO et al., 1981). In the plateau region the relief is more smoothed, with a low hydraulic gradient with predominantly superficial drainage, while in the Paranapiacaba Range the relief is more uneven, providing larger hydraulic gradients in relation to the plateau, besides drainage with superficial sections and underground.

The rivers of the Ribeira Valley allowed people to be transported and goods traded, and economic activities such as gold mining boosted the emergence of towns and cities in the seventeenth century, such as Eldorado and Sete Barras. In the following century, cattle ranching allowed the development of cities, such as Apiaí, in the Upper Vale do Ribeira region. In the first decades of the twentieth century, banana and tea production was important to the region's economy - largely made up of Japanese immigrant workers. It should be remembered that, until the highlight of the port of Santos in the mid-nineteenth century, the port of Iguape played a fundamental role in the flow of products and the economic relevance of the Ribeira Valley region (Seade 2013).

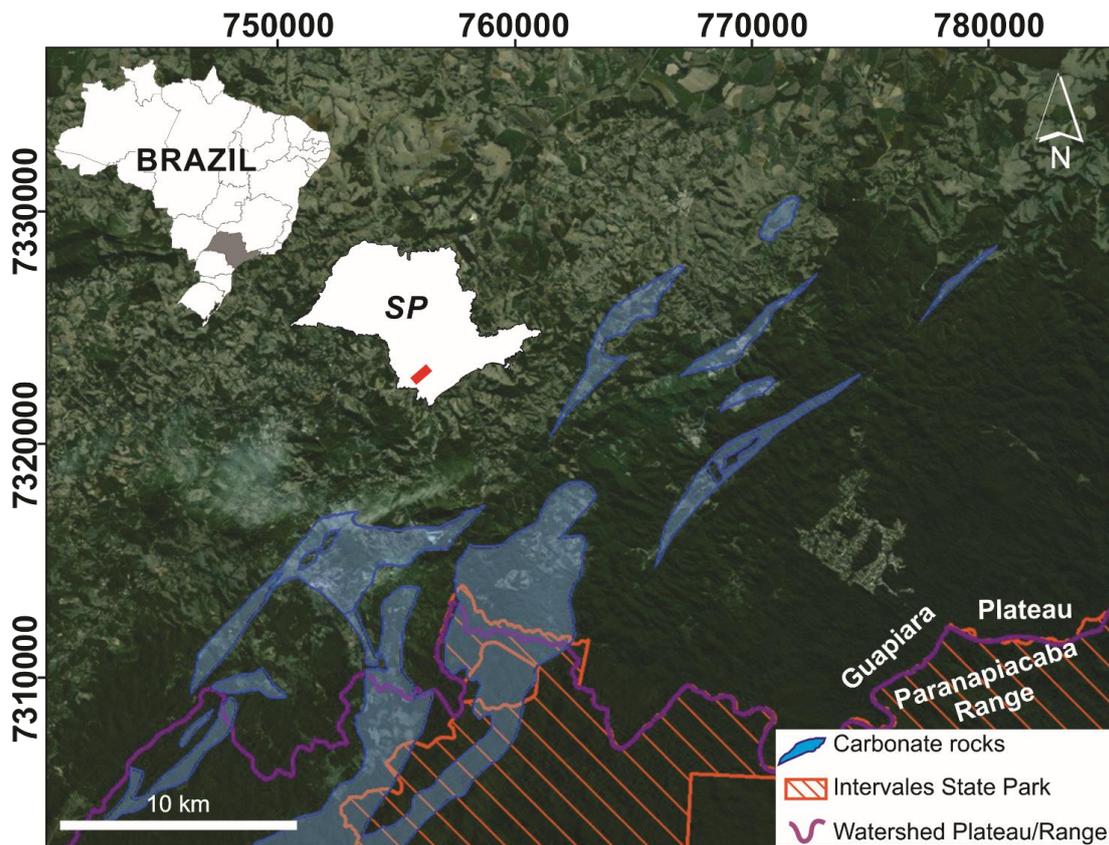


Figure 1: Localization of the area of study.

In the mid-twentieth century, the economic dynamics of the region and, as a result, the population growth of the cities, become stagnant. The decline in mineral reserves and the targeting of other investments in coffee production and marketing to industrialization in other regions of the State are factors that have led to low economic growth in the Ribeira Valley region. In this period, the agriculture of the Ribeira Valley also has a low representativeness for São Paulo agriculture, compared to livestock and sugarcane, which are expanding and consolidating in other regions of the State (SEADE, 2013).

The study area is currently comprised of the presence of several conservation units, such as the Interval State Park (PEI) and the High Ribeira State Tourist Park (PETAR), which together with other conservation units (Parapanema Nascentes State Park - PENAP, Xituê Ecological Station, Carlos Botelho State Park, and APA of Serra do Mar), form an extensive corridor of environmental protection areas, the ecological continuum of the Serra de Paranapiacaba. The presence of these conservation units allows the preservation of the karst system, but inhibits the economic development of the region (SALLUN FILHO et al., 2010; VAN BEYNEN et al., 2012).

3. GEOLOGICAL E GEOMORFOLOGICAL CONTEXT

The carbonate rocks where the studied karst is currently developed belong to the Açungui Supergroup which is composed of lithostratigraphic units that reflect sedimentary and volcanic environments, arranged in bands with predominant NE direction (Figure 2a).

The carbonate rocks belong to the Lajeado Subgroup, deposited in an open sea platfornal environment composed of an alternation of clastic and carbonate rocks (CAMPANHA; SADOWSKI, 1999). This unit is subdivided into seven others, and those of interest for this study are the Bairro da Serra formations (metacalcarenites and impure calcitic and dolomitic metacalcilutites), Furnas Mine (metacalcarenites and laminated calcilutites) and Passa Vinte (dolomitic metacalcarenites) (CAMPANHA et al., 1987; CAMPANHA, 2002). The karst system in question belongs to the Ribeira Speleological Province (KARMANN; SANCHEZ, 1979; 1986).

The geomorphological context of the study area is the transition from the Guapiara Plateau to the Coastal Province (Paranapiacaba Range), as well as a small portion of Peripheral Depression (Parapanema Depression) (Figure 2b) (PONÇANO, 1981; LENHARE; SALLUN FILHO, 2014).

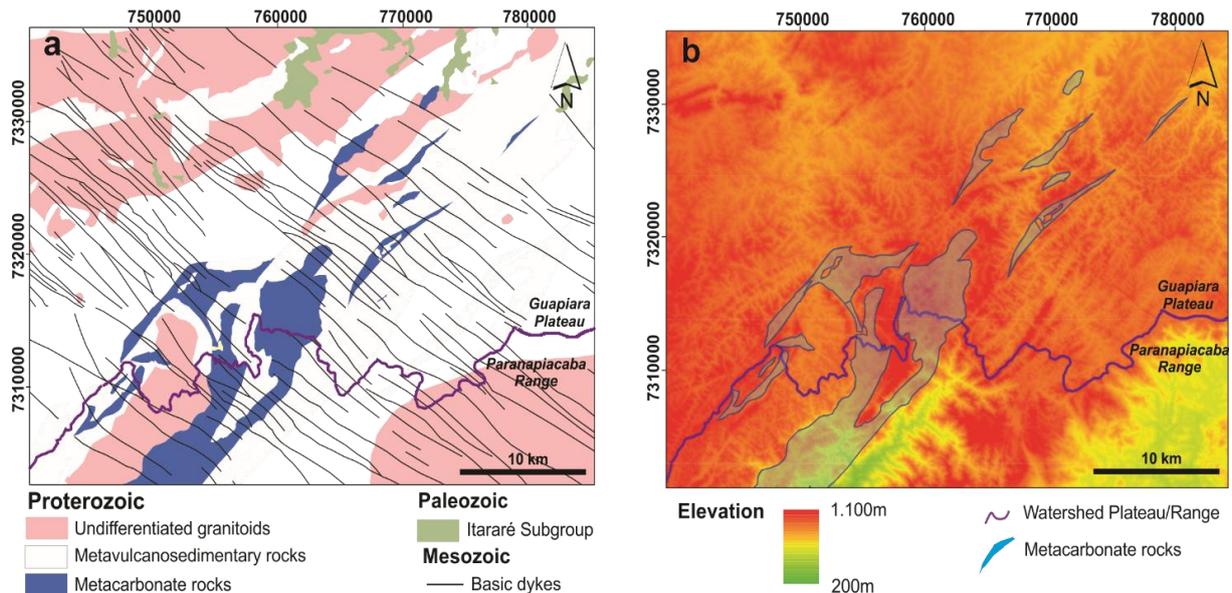


Figure 1: a: simplified regional geological context of the study area with emphasis on metacarbonate rocks (CAMPANHA, 2002); b: regional geomorphological map showing the main units covered by the study area (PONÇANO et al., 1981).

4. MATERIALS AND METHODS

The analysis of the evolution of land use and occupation in the region between Paranapiacaba Range and Guapiara Plateau used the interpretation of satellite images associated with remote sensing techniques and data compilation in a GIS environment.

The images used are the TM sensor of the LANDSAT 7 Satellite, with spatial resolution of 30 meters in the panchromatic and in the spectral of 7 bands. Images from the 220/77 band were used, from the years 2001, 2010, 2014, with cloud coverage below 1% in the total scene. The images were obtained free of charge from the INPE website and newer images are not available for download.

The images were processed using ArcGIS 10.5, with image processing modules with algorithms that integrate raster and vector formats in the same environment. After the images were selected, they were cropped to the limit of the study area. Then, a band composition that was adequate to the analysis of land use and cover was stipulated. The final band operation of each year selected for presentation and interpretation was established in: 1 - R: Band 4 - G: Band 5 - B: Band 7.

The next step, class classification, was defined based on the visual interpretation, assigning for each spectral range defined in the previous step, a predefined class. The predominant classes of use in the study area were selected based on prior knowledge of the study area. The following classes of land use and land cover were used to classify the time series:

1. Tree cover: dense vegetal cover, with high bearing;
2. Pastures/crop: pastures and crops;
3. Bare soil: cultivation of eucalyptus (*Eucalyptus*) and pine (*Pinus elliottii*);

The images were classified through supervised classification, based on the use of algorithms for pixel determination. To obtain the classes, the MAXVER-ICM classifier was used. While the MAXVER classifier associates classes by considering individual points of the image, while the MAXVER-ICM classifier (Iterated Conditional Modes) also considers the spatial dependence in the classification. In a first phase, the image is classified by the MAXVER algorithm assigning classes to the "pixels", considering the values of digital levels. The algorithm assigns classes to a given "pixel", considering the neighborhood interactively. This process is terminated when the % change (percentage of "pixels" that are reclassified) defined by the user is satisfied (NERY et al., 2013).

After classification, the classes were converted from matrix to vector. The area calculation of each class was calculated in square kilometers, after the area calculation the obtained data were tabulated and applied in tables. Finally, a thematic map of the use and coverage was developed using ArcGIS software, where other aspects of land use and occupation were compiled, such as data from mining processes and conservation units.

5. RESULTS

The geoprocessing techniques used in the LANDSAT 7 TM images highlighted some land use characteristics in the region. These techniques prioritized forested, non-forested areas and various uses of the soil (Figures 3, 4 and 5). Images from different years were used to allow an analysis of the evolution of land use and cover. In the left row of Figures 3, 4 and 5 are represented the image processed with natural color, while the right row the interpreted results for land use.

These differences between the images, the data from the geoprocessing were vectored, allowing the area calculation of each discriminated class. After the vectorization the data were grouped and tabulated for analysis of the temporal panorama of the situation of each of the target classes of study (Table 1).

In the analysis of the image of the year 2001 (Figures 3a and 3b) it is possible to observe that the forested areas predominate in the scene, however the Bare soil class stands out, mainly in the north and northwest portions, where there is a greater presence of villages and crop areas, occupying 2.8% (6.7 km²), of the carbonate rocks. The Forest class comprises natural vegetation (primary or secondary) comprising 52.4% (126.1 km²), while the Pastures/crop class covers 44.8% (108.0 km²).

In the image of the year 2010 (Figures 4a and 4b), there is an increase of areas of the Forest class covering 49.6% of the area of the selected scene, comprising 119.5 km² of the carbonate rocks area. Pastures and crops represent 106,1 km² (44.0%). The bare soil class showed a increase of most than 100% in relation to the year 2001, making 6.5% (15.6 km²) of the carbonate rock area.

Figures 5a and 5b show the situation of the study area in the year 2014. In this scenario, it can be observed that the Forest class presented a significant increase in relation to the year 2010, representing 52.5% (126.6 km²) of the carbonate rock area. Pastures and crops, on the other hand, stayed at the same levels compared to the years 2001 and 2010, accounting for 44.9% of the area (108.2 km²). The bare soil class shows the largest fall in the analyzed years. According to the analysis, in 2014, it was 2.6% (6.4 km²).

After the analysis of the images by geoprocessing techniques, a thematic map of the region was elaborated on how the use and coverage

situation is based, based on the image of 2014. In addition to the classes analyzed, the mining data and also of Conservation Units. Through the analysis of the images by geoprocessing techniques, it was produced a thematic map of the region on how the use and coverage situation is based, based on the image of 2014. In addition to the classes analyzed, the mining process data has been entered. These data refer to which phase the mining process is in, i.e., from its application for studies, authorization for mineral prospecting and research, the request for mining and the authorization of mining (Figure 6).

6. DISCUSSION

The analysis of the karstic landscape must consider several factors, some external to the karst itself, and which should be evaluated and weighted together with anthropic and environmental factors (VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005; VAN BEYNEN ET AL., 2013; DOCTOR ET AL., 2013; LENHARE; SALLUN FILHO, 2014). Research, analyzes and interpretations of land use and occupation and geoenvironmental dynamics collaborate in a consistent way with the in-depth knowledge of a region (COLLARES, 2000; GARATUZA-PAYAN et al., 2001; SILVA et al., 2005; VAEZA et al., 2008). The growing concern about land use and occupation has led governments to take interest in studies that address this issue (MEDEIROS; PETTA, 2005).

The search for gold and other minerals of economic interest, such as lead and silver, as well as arable land stimulated occupation in the region between the Paranapiacaba Range and the Guapiara Plateau since the 17th century. In the middle of the twentieth century, the economic dynamics of the region and, consequently, the population growth of the cities, are stagnant. The decline in mineral reserves and the targeting of other investments in coffee production and marketing to industrialization in other regions of the State are factors that have led to low economic growth in the Ribeira Valley region. In the same period, the agriculture of the Ribeira Valley has a low representativeness for São Paulo agriculture, compared to livestock and sugarcane, which are expanding and consolidating in other regions of the State (LEPSCH et al., 1999; SEADE, 2013).

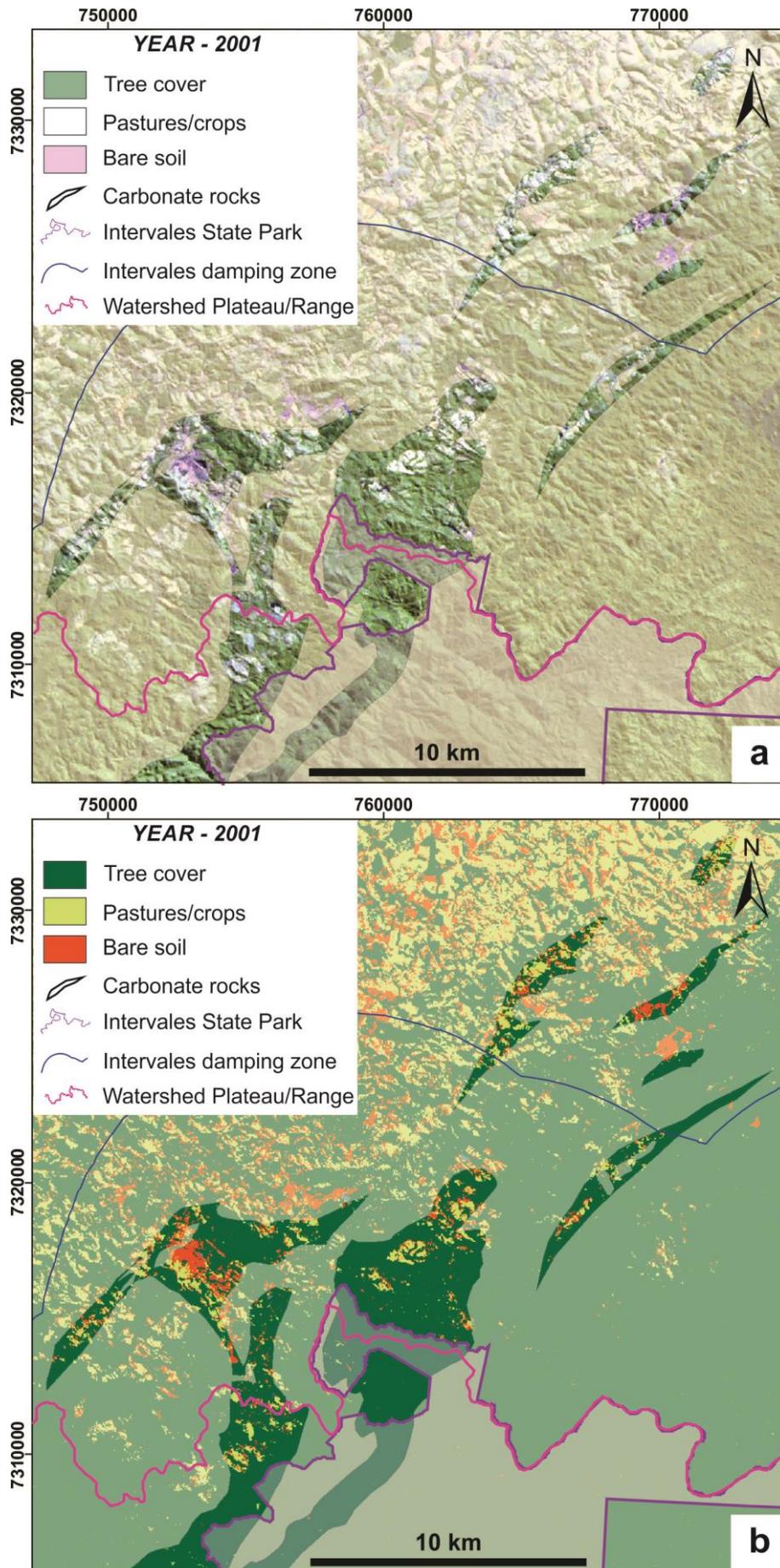


Figure 2: LANDSAT 7 TM image (RGB 457) processed with false color (a) and interpreted with the land use (b), related to the year of 2001.

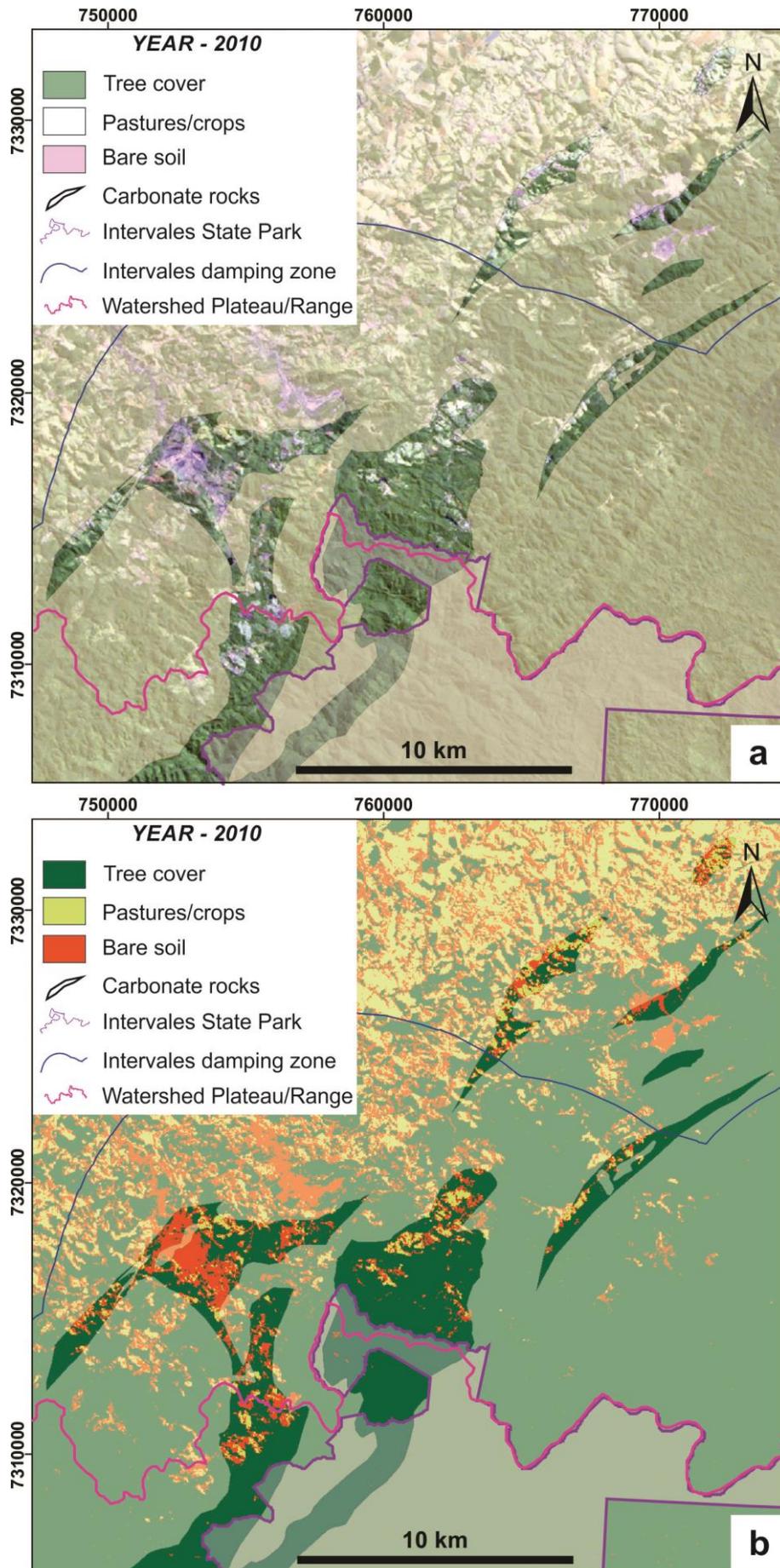


Figure 3: LANDSAT 7 TM image (RGB 457) processed with false color (a) and interpreted with the land use (b), related to the year of 2010.

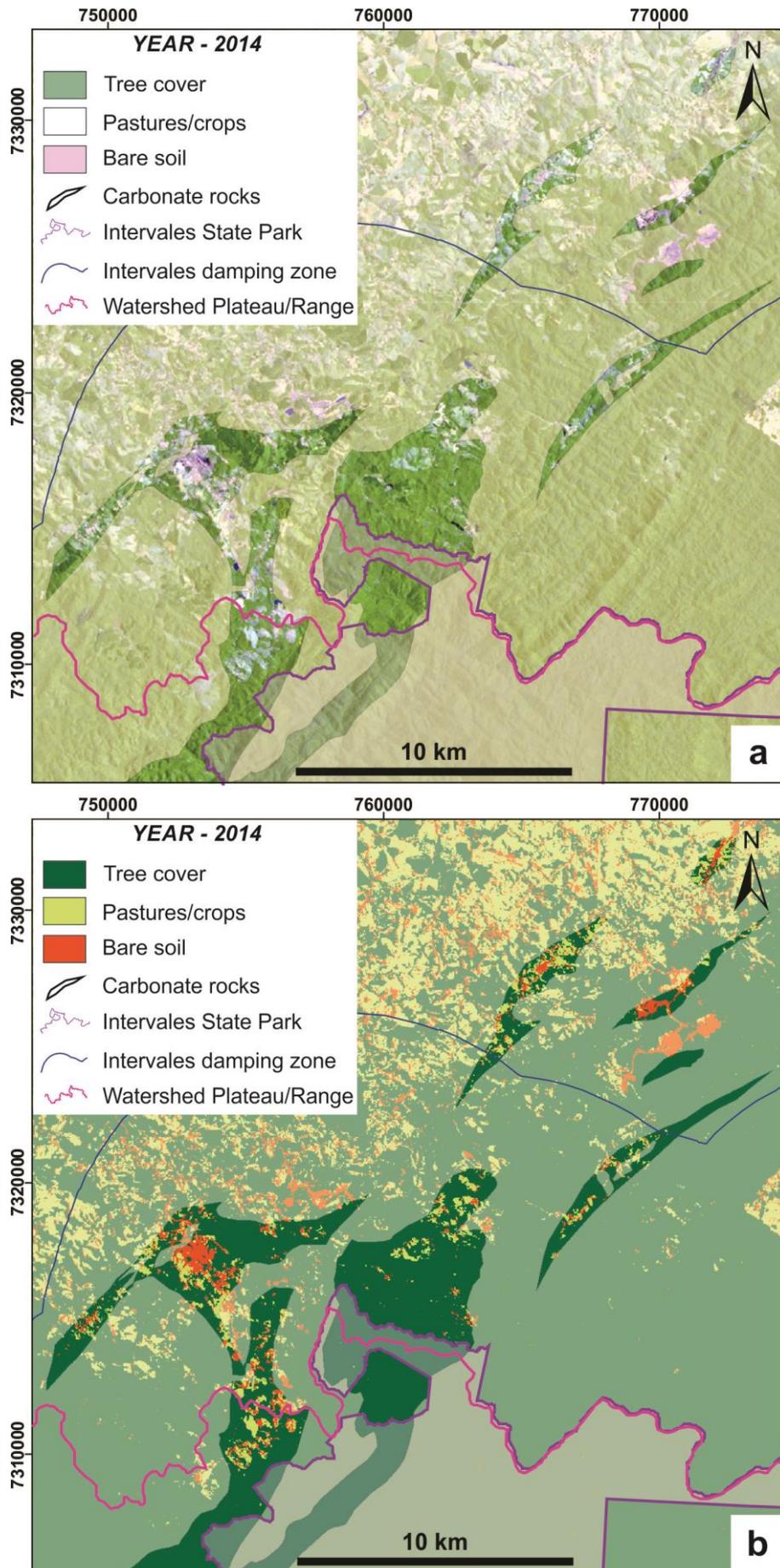


Figure 4: LANDSAT 7 TM image (RGB 457) processed with false color (a) and interpreted with the land use (b), related to the year of 2014.

Table 1: Land use and land cover scenario in the years 2001, 2010 and 2014.

LAND COVER	2001		2004		2010	
	Area (km ²)	Area (%)	Area (km ²)	Area (%)	Area (km ²)	Area (%)
Tree cover	126.1	52.4	119.5	49.6	126.6	52.5
Pastures/crop	108.0	44.8	106.0	44.0	108.2	44.9
Bare soil	6.7	2.8	15.6	6.5	6.4	2.6
Total	240.8	100.0	241.1	100.0	241.1	100.0

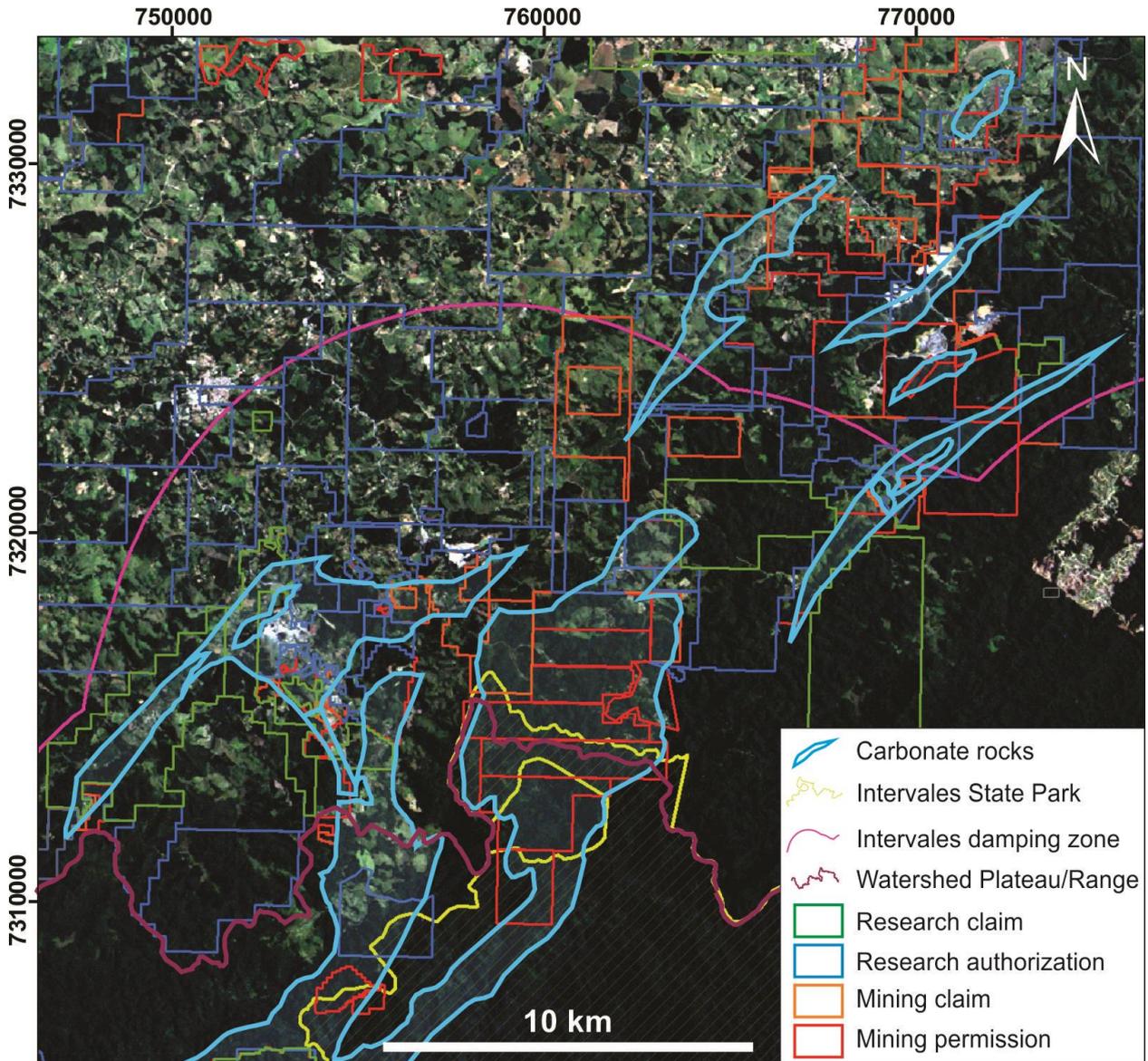


Figure 6: Mining request processes over LANDSAT 7 TM image (RGB 321, true color) in the studied region between the Guapiara Plateau (north of the watershed) and Paranapiacaba Range (south of the watershed).

The study area is currently comprised of the presence of several conservation units, such as the Intervales State Park (PEI) and the Alto Ribeira Touristic State Park (PETAR), which together with other conservation units (Nascentes do Paranapanema State Park - PENAP, Xituê Ecological Station, Carlos Botelho State Park, and Serra do Mar APA), form an extensive corridor of environmental protection areas, the ecological

continuum of Paranapiacaba. The presence of these conservation units allows the conservation and preservation of the karst system, but inhibits the economic development of the region (LENHARE; SALLUN FILHO, 2018).

This negative panorama of economic development often ends up forcing the local population out to places where there is more opportunity. Once the economic situation becomes

favorable again there is a resumption of the advance of occupation in the region.

The compartmentalization of the relief is also an important feature to be analyzed. The Guapiara Plateau region presents a smoother relief configuration in relation to the Paranapiacaba Range, which allows a greater expansion of the occupation. This situation can be observed when the selected images were compared between the years analyzed.

The methodology of tree cover analysis did not differentiate forest and afforestation, since this class is understood as one for the purpose of soil protection in karstic terrain (LENHARE; SALLUN FILHO, 2018). The reduction of tree cover percentage values between 2001 and 2010 is related to the cut of eucalyptus or pinus, a very common economic activity in the region. In 2014, the value of the tree cover percentage is related to the growth of a new eucalyptus and pine crop. This fact also explains an increase in the percentage of soil exposed in the year 2010, since between the years of 2001 and 2014 the area covered by this class is practically constant.

Currently, the main activities that can cause imbalance in the karst system are: mining of carbonate rocks (cement and lime production), agriculture (vegetables, fruit growing and forestry) and the disordered human occupation itself. The mining of carbonate rocks can cause lowering of water table, suppression of caves and associated fauna, besides the decrease in area of the karstic environment itself. Agriculture, in turn, may unbalance the speed of the natural process of karstification by withdrawing plant cover and introducing agrochemicals into the karst hydrological system.

Disordered human occupation can interfere in many ways, such as contamination of groundwater, disposal of domestic and industrial waste inside caves and dolines, construction of buildings in hazardous areas, among others. On the other hand, the presence of Conservation Units (such as PEI and PETAR) is of extreme importance for the conservation and preservation of karstic systems

As already observed, the human presence in the Guapiara Plateau is predominant and the pressure exerted on the karst system is greater when compared to the situation of Paranapiacaba Range, where the existence of conservation units guarantees the preservation of vegetation areas and soil permanence, contributing to the karst cover protection.

In the region of Paranapiacaba Range the presence of conservation units guarantee the preservation and conservation of the karst system. This characteristic emphasizes the importance of the establishment of conservation units in areas considered environmentally fragile. The existence of conservation units may guarantee some preservation of the karst system, but some parks in the region have tourism as their main activity.

Techniques of geoprocessing of images in a temporal series become fundamental tools for the analysis and occupational planning of a region (GARATUZA-PAYAN, et al. 2001; FRISCHBUTTER, 2002; SOUZA FILHO, 2005; VITAL et al., 2005; CARVALHO JUNIOR et al., 2006; SIRI et al., 2009; CHARIF et al., 2013). The compilation of these techniques with data from a variety of sources (geology, geomorphology, mining, agriculture etc.) allows to draw a panorama of the situation of region of study, optimizing anthropic occupation, often with a good safety range.

7. CONCLUSIONS

The occupation in the region between the Paranapiacaba Range and Guapiara Plateau is disorderly since the Brazilian colonial period. The lack of an order in human occupation threatens the physical environment, for example, the karst system that occurs there, and the population that depends on it.

The concept of economy is dynamic in time and depends on several factors that are often independent of the regional economic situation, such as currency fluctuation, mineral supply and demand, proximity to the consumer market, quality of the final product, manufacturing, among others. Historically, the region of study has already witnessed the development of several sectors of economy such as agriculture and mining. All these sectors of primary economy have played a prominent role in some period of the history of regional occupation, but are currently in decline (SEADE 2013).

The geomorphological configuration conditioned the occupation that historically has been more intense in the plateau by its softer reliefs. Thus, the environmental situation of karst is distinct in the sectors to the north and south of the divisor. In the Guapiara Plateau the anthropic occupation is more incisive than in the Paranapiacaba Range, with the presence of mining enterprises in activity, agriculture of various natures, forestry and the establishment of communities.

To the south of the watershed, the karst situation configures areas of environmental protection (PEI and PETAR), and in the PEI there is a Management Plan, which confers an aspect of karst environment protection (SALLUN FILHO et al., 2008).

The karst in the region between the Paranapiacaba Range and the Guapiara Plateau, observed through a temporal series of images and analyzed with geoprocessing techniques, is protected and preserved. There are exceptions, such as mined areas and presence of agriculture (northern portion). However, many of the areas that may be subject to anthropogenic pressure are under the control of management plans and environmental laws, which are not always effective but represent an attempt to conserve and preserve the environment.

Thus, the elaboration of management plans is fundamental to complement the protection of the karst system (SALLUN FILHO et al., 2008; LENHARE; SALLUN FILHO, 2018). However, it should be recognized that, even with existing management plans, such as Intervales State Park, these should be reviewed and adjusted with the updating of environmental laws, economic situation and progress of science.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the São Paulo Research Foundation (FAPESP; Grant #2012/05632-2) for financing the study, the scholarships of B.D. Lenhare (process #2012/01424-6), and CNPq for W. Sallun Filho and C.A. Moreira scholarships.

REFERENCES

- CAMPANHA, G. A. da C. **O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira**. 2002. 105 p. Tese (Livre-Docência), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- CAMPANHA, G. A da C.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, M. A. de. Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da faixa de dobramentos Apiaí. In: SIMPÓSIO SULBRASILEIRO de GEOLOGIA, 3, Curitiba. **Atas**. Curitiba: SBG, 1987. Vol. 2, p.725-742.
- CAMPANHA, G. A da C.; SADOWSKI, G. R. Tectonics of the Southern Portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). **Precambrian Research**, v.98, n.1-2, p.31-51, 1999.
- CARVALHO JUNIOR, O. A. de; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da Floresta Estacional Decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.24, n.3, p.319-332, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GILLESPIE, A.R.; TRANCOSO GOMES, R.A.; DE SOUZA MARTINS, E.; SILVA, N.C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v.6, n.1, p.330–351, 2014.
- CHARIF, A.; AÏT MALEK, H.; EL BCHARI, F.; THEILEN-WILLIGE, B.; CHAIBI, M.; LÖWNER, R.; RIDAOUI, M.; AYT OUGOUGDAL, M.; NAKHCHA, C. Mapping karstic geohazards in the Safi Region, Morocco, by the use of Landsat, Ikonos and RapidEye images. In: PROCEEDING OF 24TH GEOLOGICAL REMOTE SENSING GROUP (GRSG) ANNUAL MEETING—STATUS AND DEVELOPMENTS IN GEOLOGICAL REMOTE SENSING, 24, 2013, Berlin, Germany. **Proceedings**. Berlin: 2013. P.9-11.
- COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari – SP**. 2000. 194 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- DOCTOR, D.H.; YOUNG, J.A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LIDAR-derived digital elevation data. In: PROCEEDINGS OF THE 13TH MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST, 13, 2013, Carlsbad, NM, USA. **Proceedings**. Tampa: University of South Florida, FL, USA, 2013. p.449-458.

- FRISCHBUTTER, A. Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images. **Geofísica Internacional**, v.41, n.2, p.87-102, 2002.
- GARATUZA-PAYAN, J.; SHUTTLEWORTH, W. J.; PINKER, R. T. Satellite measurements of solar radiation in the Yaqui Valley, Northern Mexico. **Geofísica Internacional**, vol.40, n.3, p.207-218, 2001.
- KARMANN, I; SANCHEZ, L. E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Espeleo-Tema**, v.13, p.105-167, 1979. www.cavernas.org.br/espeleo-tema/Espeleo-Tema_v13_105-167.pdf.
- KARMANN, I; SANCHEZ, L. E. Speleological provinces in Brazil. In: IX CONGRESO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9, 1986. Barcelona. Anais. Barcelona: IUS, vol.1, p.151-153.
- LEITE, E.F.; ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **Revista Eletrônica de Geografia**, v.4, n.12, p.90-106, 2012
- LENHARE, B.D. **Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio Paranapanema) e do Rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape) na região do Parque Estadual Intervales (PEI), Estado de São Paulo**. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- LENHARE, B.D.; SALLUN FILHO, W. O carste nas cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Paranapanema) e do Rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape), SP. **Geociências**, v.33, n.4, p.686-700, 2014.
- LENHARE, B.D.; SALLUN FILHO, W. Application of EPIK and KDI methods for identification and evaluation of karst vulnerability at Intervales State Park and surrounding region (Southeastern Brazil). **Carbonates and Evaporites**, v.34, n.1, p.175-187, 2019.
- LEPSCH, I.F.; PRADO, H.; MENK, J.R.F.; SAKAI, E.; RIZZO, L.T.B. **Levantamento de reconhecimento com detalhes dos solos da região do Ribeira de Iguape no estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Agricultura e Abastecimento, Instituto Agrônomo, 1999. 1 mapa. Escala 1:250.000.
- MEDEIROS, C.N.E.; PETTA, R.A. Exploração de imagens de satélite de alta resolução visando o mapeamento do uso e ocupação do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais**. Goiânia: INPE, 2005. p.2709-2716.
- NERY, C.V.M.; FERNANDES, F.H.S.; MOREIRA, A.A.; BRAGA, F.L. **Avaliação das Técnicas de Classificação MAXVER, MAXVER – ICM e Distância Mínima Euclidiana de acordo com Índice Kappa (Evaluation of Classification Techniques MAXVER, MAXVER-ICM and Minimum Euclidean Distance according to Kappa Index)**. Revista Brasileira de Geografia Física. 6(2). 2013
- PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J.J.; DOWD, P.A. **Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphologic mapping and morphometric analysis**. Acta Carsologica. 42:17–24. 2013
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981, IPT, n.1183.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 5ª ed. Editora da Universidade Federal de Uberlândia: 2003. 238 p.

- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, A.J.; SALLUN, A.E.M.; HIRUMA, S.T.; KARMANN, I. **Carste**. São Paulo: Fundação Florestal (FF/SIMA-SP), 2008. Disponível em: arquivos.ambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/2012/01/1.%20Volume%20Principal/cad%20DIAGNOSTICO%20E%20AVALIACAO/pag91_138CARSTE.pdf. Acesso em: 26 set. 2019.
- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, A.J.; HIRUMA, S.T.; SALLUN, A.E.M.; KARMANN, I. O carste no plano de manejo do Parque Estadual Intervales e zona de amortecimento, Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Escola de Minas**, v.63, n.3, p.441-448, 2010.
- SEADE - FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Atlas Seade da Economia Paulista. Disponível em: www.seade.gov.br/produtos/atlasecon/. Acesso em: dezembro de 2018.
- SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**, v.112, n.1-2, p.106-121, 2009.
- SILVA, M.K.A.; BRITO, J.L.S.; ROSA, R. Mapeamento do uso do solo no município de Pedrinópolis – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais**. Goiânia: INPE, 2005. p.285-291.
- SOUZA FILHO, P.W.M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n.4, p.427-435, 2005.
- TAURA, T.A.; ALVAREZ, I.A.; SÁ, I.B.; PEREIRA, L.A.; SANTOS, S.M. Sensoriamento Remoto na Análise da Expansão do Uso e Ocupação do Solo em Petrolina-PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2011. p.6939-6946.
- VAEZA, R.F.; OLIVEIRA-FILHO, P.C.; DISPERATI, A.A.; MAIA, A.G. Uso e ocupação do solo a partir de imagens orbitais de alta resolução para estudo em bacia hidrográfica em área urbana. In: Seminário de Pesquisa, 19, Semana de Iniciação Científica, 14, 2008, Irati. **Anais**. Irati: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2008.
- VAEZA, R.F.; OLIVEIRA-FILHO, P.C.; DISPERATI, A.A.; MAIA, A.G. Uso e ocupação do solo a partir de imagens orbitais de alta resolução. **Floresta e Ambiente**, v.17, n.1, p.23-29, 2010.
- VAN BEYNEN, P.; TOWNSEND, K.A. **Disturbance index for karst environments**. **Environmental Management**, v.36, n.1, p.101-116, 2005.
- VAN BEYNEN, P.; BRINKMANN, R.; VAN BEYNEN, K.A. Sustainability index for karst environments. **Journal of cave and karst studies**, v.74, n.2, p.221-234, 2012.
- VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; AMARO, V.E. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira: área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n.3, p.233-241, 2005.
- WILLIAMS, P.W. (ed.) **Karst Terrains: Environmental changes and human impact**. Catena Supplement, 1993. 268 p.

Fluxo editorial:

Recebido em: 15.02.2019

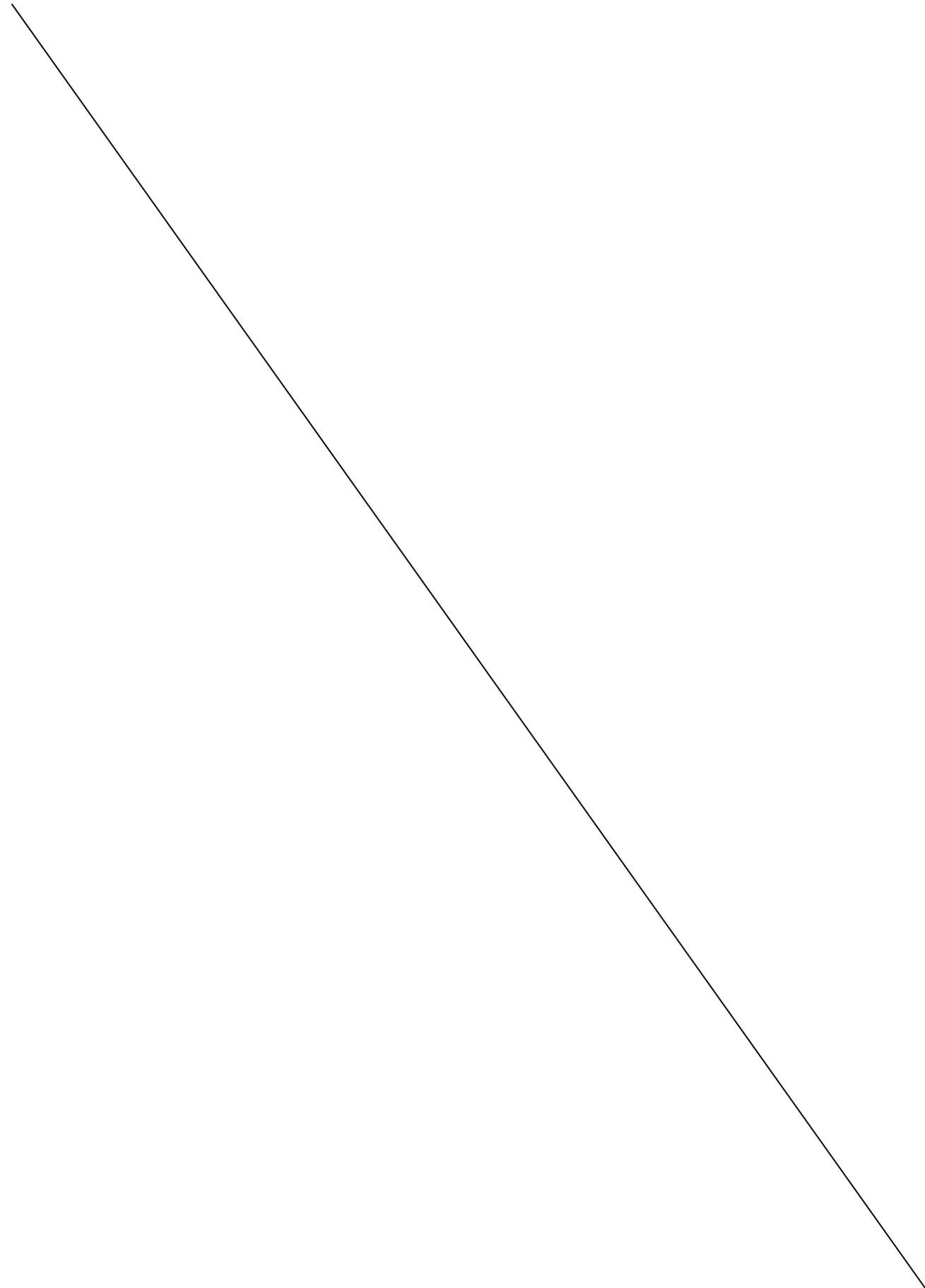
Aprovado em: 16.09.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).

Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



ESTUDOS PRELIMINARES DE CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL E GEOMECÂNICA EM CAVIDADES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA

LITHOSTRUCTURAL AND GEOMECHANICAL PRELIMINARY STUDIES IN IRON CAVES, CARAJÁS-PA

Chrystophe Ronaib (1); Allan Douglas (1); Vanese Vieira (2); Marcelo Barbosa (3); Rafael Guimarães (3); Iuri Brandi (3)

- (1) Brandt Meio Ambiente Ltda. Parauapebas PA.
(2) Vegeo. Belo Horizonte MG.
(3) Vale S.A. – Gerência de Espeleologia e Tecnologia. Belo Horizonte MG.

Contatos: cpeixoto@brandt.com.br; allan.dfs@hotmail.com; vanesevieira@yahoo.com.br; marcelo.roberto.barbosa@vale.com; rafael.guimaraes@vale.com; iuri.brandi@vale.com.

Resumo

A legislação ambiental brasileira determina que cavidades naturais e sua área de influência não podem sofrer impactos negativos irreversíveis em função das operações de mina em seu entorno, até que estudos específicos sejam realizados. No tocante aos aspectos físicos, este trabalho apresenta estudos preliminares de caracterização litoestrutural e geomecânica em cavidades ferríferas de Carajás, PA. São levantados parâmetros como grau de alteração, resistência, grau de fraturamento, RQD, condição hidrológica e características de descontinuidades como; persistência, abertura, espaçamento, rugosidade e preenchimento. O grau de alteração e resistência da rocha baseou-se na análise tátil – visual convencional, introduzindo-se a correlação com ensaios *in situ* de resistência a compressão uniaxial, utilizando-se o esclerômetro de Schmidt. São discutidos os procedimentos de mapeamento e aquisição dos parâmetros, sua quantidade e qualidade, bem como a análise dos resultados, como forma de contribuição para estudos geoespeleológicos.

Palavras-Chave: Cavidade ferrífera; caracterização geomecânica; esclerômetro de Schmidt; Carajás.

Abstract

*Brazilian environmental legislation request that natural caves and their area of influence cannot be damaged due to operations in their surroundings, until specific studies are carried out. In terms of the physical features, this work presents preliminary studies of lithostructural and geomechanical characterization in iron caves, in Carajás, PA. Parameters such as weathering, strength, fracturing, RQD index, hydrological conditions and discontinuities planes features such as persistence, openings, spacing, roughness and fill are determined. The degree of weathering and resistance was based on conventional tactile-visual analysis, and the correlation was introduced with *in situ* tests of uniaxial compression strength (UCS), using the Schmidt hammer. It is discussed the mapping and parameters acquisition procedures, their quantity and quality, as well as the analysis of the results, in order to geospeleological studies improvements.*

Key-Words: Iron caves; geomechanical characterization; Schmidt sclerometer, Carajás.

1. INTRODUÇÃO

A legislação brasileira por meio do Decreto Federal nº 6.640 de 2008, determina que as cavidades naturais subterrâneas de relevância máxima, bem como sua área de influência, não sofram impactos ambientais irreversíveis. De acordo com a Portaria IBAMA 887 e Resolução CONAMA 347, a área de influência de uma cavidade deve abranger uma distância mínima de proteção de 250m, até que estudos específicos determinem um perímetro de entorno definitivo.

Conhecer e entender a geotecnia dos ambientes subterrâneos tem sido um grande desafio nos últimos anos. Subdividido em escavações de obras de engenharia e em cavidades naturais, tais ambientes necessitam de análises e estudos distintos.

Em relação às cavidades naturais subterrâneas, existe pouca informação disponível na literatura sobre análise de estabilidade, e um dos principais métodos para acompanhar e controlar quaisquer danos ocasionados pelas operações mineiras nas proximidades é a utilização de sismógrafos de engenharia, realizando o controle de

influências sismográficas provenientes do desmonte de rocha (GONTIJO et al., 2014).

O conhecimento sobre as fragilidades litoestruturais dos maciços rochosos onde se inserem as cavidades, identificando deformações ou movimentos não visíveis (internos à rocha) ou pouco perceptíveis (microfissuras), bem como a determinação dos parâmetros geomecânicos dos diferentes tipos litológicos, são fundamentais para estabelecer um estudo mais preciso sobre o comportamento estrutural das cavidades com a aproximação das operações de lavra (BVP, 2009; BRANDI et al., 2015).

Neste trabalho apresenta-se os procedimentos de mapeamento e aquisição dos parâmetros num estudo preliminar de caracterização litoestrutural e geomecânica em três cavidades ferríferas de Carajás, PA, (N4E_0092, N4E_0033 e N4E_0008), como forma de contribuição para estudos geoespeleológicos.

2. LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado nas cavidades N4E_0092, N4E_0033 e N4E_0008, localizadas na área de entorno da mina N4EN (Figura 1) no Complexo Minerador em Carajás, município de Parauapebas, região sudeste do estado do Pará.

Segundo Gonçalves et al. (2016), as cavidades estudadas ocorrem em domínio de coberturas lateríticas, sendo individualizados três horizontes de intemperismo típicos dos platôs de Carajás, associados por vezes, às rochas-matrizes subjacentes. Do topo para a base, tem-se: Horizonte Crosta Laterítica, mostrando porções detríticas e zonas cimentadas por oxi-hidróxidos de ferro, cujo litotipo dominante é a Crosta Laterítica Detrítica (CLD); Horizonte de Transição, composto por uma trama constituída por oxi-hidróxidos de ferro e mostrando localmente zonas de baixa densidade associadas à ocorrência de cavidades, cujo litotipo dominante é a Formação Ferrífera Laterítica (FFL), e por fim, o Horizonte Saprolito, que pode ser constituído de argilas, caso se desenvolva sobre rochas vulcânicas ou de minério de ferro hematítico, se proveniente de jaspilitos (Tabela 1).

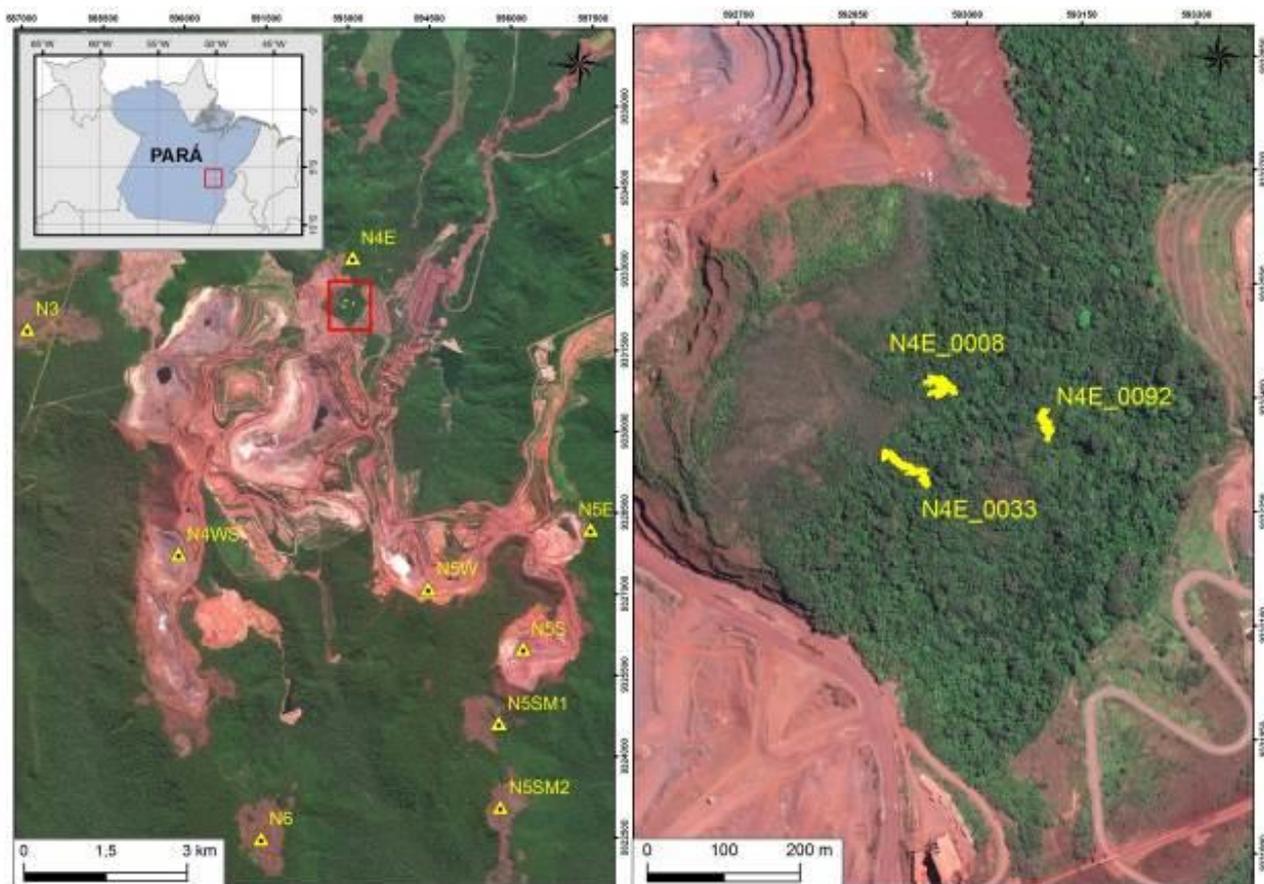


Figura 1: Localização das cavidades estudadas (projeção em superfície) nas proximidades da mina N4E.

Tabela 1: Descrição resumida dos três horizontes de intemperismo típicos dos platôs de Carajás modificado de Gonçalves et al. (2016).

Horizonte de Intemperismo	Espessura (m)	Descrição Geral
Crosta Laterítica	0,5 a 15	Clastos angulosos a sub-arredondados, mal selecionados (cm a m), e matriz/cimento silto-arenoso de óxido/hidróxido de ferro endurecido. Lítotipo dominante: Crosta Laterítica Detritica (CLD)
Horizonte de Transição	0,5 a 20	Bandas de óxido/hidróxido de ferro intercaladas, geralmente porosas a texturas cavernosas. Em geral, fraturadas e com intenso intemperismo. Lítotipo dominante: Formação Ferrífera laterítica (FFL)
Saprolito	> 20	Elevado grau de alteração (rocha completamente alterada), com presença pontual de rocha alterada solo saprolítico. Lítotipo dominante: Saprolito Rocha Ferrífera (SAPRF)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização geomecânica

Sistemas de classificação são adotados em geral na fase inicial de projetos geotécnicos, e englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos e fornecem indicações no que diz respeito às propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço. No Brasil, os métodos mais utilizados são os sistemas RMR (*Rock Mass Rating*, BIENIAWSKI, 1989), Q - Tunneling Quality Index (BARTON et al., 1974), (BARTON; GRIMSTAD, 1994) e GSI (*Geological Strength Index*), (HOEK et al., 1995), (MARINOS; HOEK, 2000), (HOEK et al., 2013). Estas classificações atribuem pesos aos parâmetros relativos às características do maciço, sendo posteriormente obtido um índice geomecânico que resulta de aplicação de expressões de cálculo associados ao sistema empírico utilizado.

Em geral, as classificações baseiam-se na combinação de alguns dos seguintes parâmetros (FERRER; VALLEJO, 1999).

- Ω Grau de alteração;
- Ω Resistência do material rochoso;
- Ω RQD;
- Ω Orientação das descontinuidades;
- Ω Condições das descontinuidades (persistência, grau de fraturamento, rugosidade, preenchimento e alteração da parede - meteorização);
- Ω Condição hidrológica;

Interessante ressaltar que a resistência geomecânica foi obtida a partir de análise tátil-visual (dados qualitativos), em decorrência da impossibilidade da aplicação de golpes de martelo convencional no interior de cavidades por força da legislação vigente, introduzindo-se, para efeito comparativo, a utilização de um equipamento portátil denominado esclerômetro ou martelo de Schmidt (dados quantitativos), por se tratar de ensaio não destrutivo de determinação da resistência à compressão uniaxial.

O levantamento de todos os parâmetros foi realizado no interior de três cavidades ferríferas, considerando-se os atributos médios da janela de representação do ponto de mapeamento.

Uma boa classificação geomecânica depende de uma boa caracterização geológico-geotécnica da rocha intacta, do bloco unitário e do maciço rochoso, incluindo as descontinuidades e os “defeitos” presentes, o que dá suporte a uma previsão mais apurada do comportamento dos maciços frente a uma solicitação imposta em um projeto de engenharia (VIEIRA et al., 2015). Para caracterização geomecânica são seguidos neste trabalho, os índices definidos pela ISRM (*International Society for Rock Mechanics*) e autores consagrados, como Bieniawski (1989) (Tabelas 2 a 5).

Tabela 2 - Classificação quanto ao índice de resistência (Vieira, 2015).

Grau	Resistência	Descrição	Resistência à compressão uniaxial
R0	Rocha extremamente branda	Marcada pela unha do polegar	0,25 - 1
R1	Rocha muito branda	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada em fatias com um canivete	1 - 5
R2	Rocha branda	Pode ser cortada em fatias com canivete com dificuldade. Marcas superficiais obtidas com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo	5 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser esmigalhada ou cortada em fatias com canivete. Podem-se fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo.	25 - 50
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessários muitas pancadas com o martelo de geólogo.	100 - 250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtém lascas percutindo com o martelo de geólogo.	> 250

Tabela 3 - Classificação quanto ao estado de alteração (ISRM, 1981).

Grau	Alteração	Descrição
A1	Rocha Sã	Alteração mineralógica nula a incipiente. Minerais preservam características originais e brilho, cor e clivagem.
A2	Levemente Alterada	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas. Perda de brilho dos minerais.
A3	Medianamente Alterada	A matriz apresenta-se descolorida com evidências de oxidação, caulinição.
A4	Alterada	Descolorização generalizada, mas ainda com características da rocha.
A5	Extremamente Alterada (Saprólito)	Alteração mineralógica acentuada. Cores bastante modificadas. Possível presença de núcleos rochosos menos alterados.
A6	Solo residual (jovem) Solo saprolítico	Todo o material está alterado para solo. Estrutura original da rocha está preservada

Tabela 4 – Parâmetro de caracterização geomecânica - RQD

RQD	Descrição
91-100%	Excelente
76-90%	Bom
51-75%	Razoável
26-50%	Fraco
0-25%	Muito fraco

Tabela 5 – Parâmetros de caracterização geomecânica - Condições das Descontinuidades.

Grau de Fraturamento	Espaçamento	Descrição
GF	INTERV. Cm	
F1	>200	Maciço
F2	60-200	Pouco fraturado
F3	20-60	Medianamente fraturado
F4	0,6-20	Muito fraturado
F5	<0,6	Extremamente fraturado

Rugosidade		Legenda
Irregular/Descontínua	Rugosa	IR
	Lisa	IL
	Espelhada	IE
Ondulada	Rugosa	OR
	Lisa	OL
	Espelhada	OE
Plana	Rugosa	PR
	Lisa	PL
	Espelhada	PE

Persistência (m)	Distância (m)
Muito pouca persistência	<1
Pouca persistência	1 A 3
Persistência média	3 A 10
Persistência alta	10 A 20
Persistência muito alta	> 20

Abertura (mm)
Fechada
<0,1mm
0,1 a 1mm
1 a 5mm
> 5mm

Alteração da parede	Legenda
Inalterada	A6
Levemente alterada	A5
Moderadamente alterada	A3
Muito alterada	A1
Decomposta	A0

Grau de alteração e resistência

O grau de alteração e resistência da rocha baseou-se na análise visual do brilho e cor dos minerais e da rocha, além de uma análise tátil das condições de friabilidade. Sabe-se que em uma mesma litologia, quanto maior o grau de alteração da rocha, menos resistente ela se encontra.

RQD (Rock Quality Designation)

O índice RQD foi desenvolvido por Deere e Miller (1966), a fim de fornecer uma estimativa qualitativa dos maciços rochosos *in situ*, sendo uma das variáveis do RMR. O grau de fraturamento se expressa comumente pelo índice RQD (Rock Quality

Designation) proposto por Deere *et al.* (1967). Apesar da sua utilidade prática, este índice não considera aspectos como a orientação, o espaçamento, os preenchimentos e outras condições das descontinuidades, assim, não são suficientes para descrever as características de fraturamento dos maciços rochosos. O valor do índice RQD se determina a partir da frequência do espaçamento das descontinuidades, mediante a seguinte expressão que proporciona o valor teórico mínimo do RQD (PRIEST, 1993):

$$RQD_{min} \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

Onde λ é a inversa do espaçamento médio das descontinuidades.

Condições das discontinuidades

As características principais das discontinuidades com implicações no comportamento geotécnico dos maciços fraturados são, segundo a ISRM (1978), Hoek & Bray (1981) e Priest (1993), a orientação, o espaçamento (grau de fraturamento), a persistência, a rugosidade, o preenchimento e a abertura. Além destas, é também importante referir a percolação nas discontinuidades e o estado de alteração das respectivas paredes.

A dimensão e forma dos blocos tem relação direta com as características das discontinuidades, sendo resultado do número de famílias de discontinuidades, a sua orientação, o seu espaçamento e persistência.

3.2 Ensaio de resistência (Esclerômetro de Schmidt)

O martelo ou esclerômetro de Schmidt foi inicialmente projetado para realizar medidas da resistência de corpos de prova de concreto e, posteriormente, adaptado por diversos autores para o estudo de maciços rochosos, podendo fornecer por meio de correlações, valores aproximados de resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade de rochas (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Nos trabalhos de campo foi utilizado o esclerômetro portátil do tipo L. Este equipamento permite um ensaio de campo *in situ* que avalia a dureza da rocha através da medição do rebote (R), por meio de uma mola de aço, quando percutida sobre a superfície rochosa. Estes impactos do esclerômetro distam de, no mínimo, 3 cm um do outro e 5 cm de arestas e cantos, tendo sido mantido em ângulo reto, de forma perpendicular à superfície ensaiada (Figura 2). Para cada ponto ensaiado, a área delimitada possui no máximo 2 x 2m para executar 20 leituras de ricochete sem nenhum descarte dos valores baixos ou altos, obtendo-se valores em relação à média e mediana (VILES, et al., 2010).

Diferente de outros tipos de esclerômetros convencionais, para este do tipo Rock Schmidt, não há necessidade de correção com relação à direção horizontal dos ricochetes, pois conta com metodologia de leitura eletrônica por diferença de velocidade do êmbolo onde não há influência da gravidade durante o ensaio. Os valores de dureza obtidos com o esclerômetro são lançados no ábaco de correlação (Ábaco de Miller) para estimar o valor da resistência à compressão uniaxial (Figura 3).

Os ensaios ocorreram de forma sistemática ao longo das paredes das cavidades em pontos

específicos segundo dois critérios: mudanças das características litoestruturais e o intervalo entre os pontos ensaiados, de forma que todo o perímetro da cavidade foi coberto. Todos os pontos foram plotados na planta na cavidade.



Figura 2: Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt.

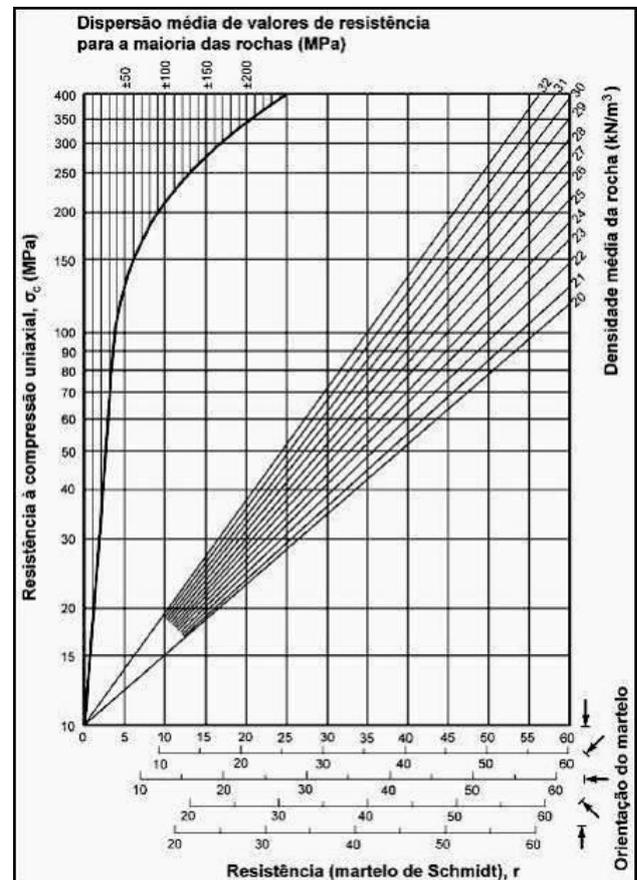


Figura 3: Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do *martelo de Schmidt* (adaptado de Gonzáles de Vallejo et al., 2002).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização litoestrutural e geomecânica

As três cavidades estudadas se desenvolvem predominantemente em formação ferrífera laterítica e, localmente em crosta laterítica detrítica e rocha máfica intemperizada. Estes dois últimos litotipos

não serão aqui discutidos em função da sua baixa representatividade.

Em relação a formação ferrífera laterítica, o bandamento composicional marca sua anisotropia e constitui uma estrutura penetrativa, às vezes com vazios entre as bandas de Fe, resultantes da dissolução/lixiviação da sílica, ou ainda exibe arranjo caótico mostrando bandas de hematita fragmentadas, reorientadas e às vezes cimentadas, evidenciando processo de alteração/laterização mais avançado (Figuras 4a, b, c). Dobras do tipo *kink bands* são comuns e ocorrem desde a escala centimétrica à métrica (Figura 4d).

Nas cavidades **N4E_0033** e **N4E_0092**, nota-se alongamento do conduto principal na direção do eixo de duas grandes dobras de direções NW-SE e N-S respectivamente, que possivelmente controla a morfologia das cavidades (BRAGA *et al.*, 2017).

Grau de alteração e resistência

Para a avaliação qualitativa do estado de alteração e resistência, as três cavidades se apresentam em geral medianamente alteradas (A3 - Figura 5a). Nos setores distais a formação ferrífera

se mostra alterada (A4) com presença maior de hidróxidos de ferro, resultantes da hidratação dos minerais ferrosos (particularmente hematita e magnetita), conferindo à rocha uma tonalidade amarelada a avermelhada. No que diz respeito à resistência, as rochas se mostram medianamente resistentes (R3), com setores/núcleos pouco resistentes (R2) e mais resistentes (R4), como mostra o histograma de resistência da figura 5b.

Grau de fraturamento

Em termos geotécnicos o grau de fraturamento na formação ferrífera (FFB) predominam maciços muito fraturados (F₄), como mostra o histograma da figura 5c, formando blocos prismáticos, às vezes achatados (no plano do bandamento) ou romboédricos, de dimensões decimétricas a métricas. Nas demais descontinuidades o grau de fraturamento mostra-se bastante variado, notando-se fraturas isoladas (geralmente sub-horizontais) ou concentrações localizadas com espaçamento decimétrico a métrico (fraturas subverticais), cuja classificação varia entre (F1 e F3).

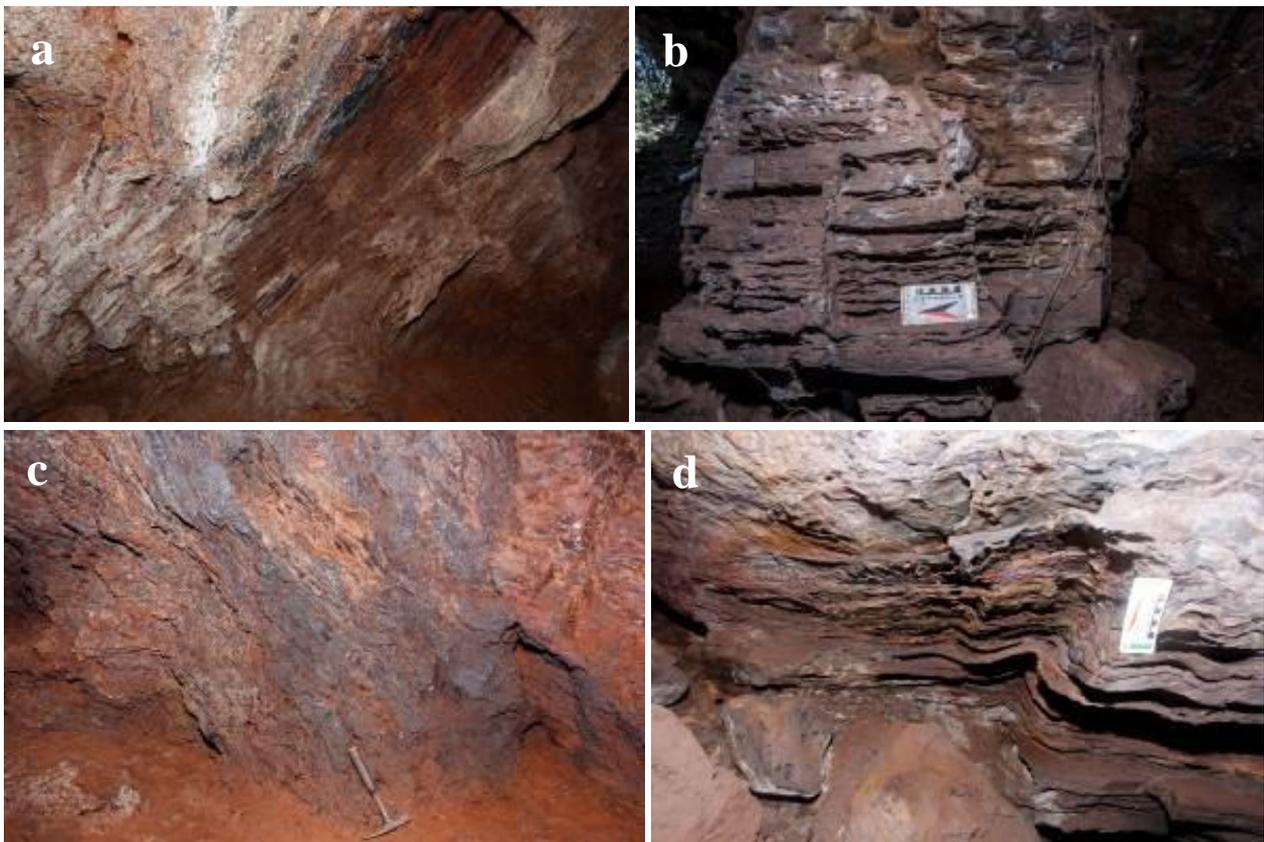


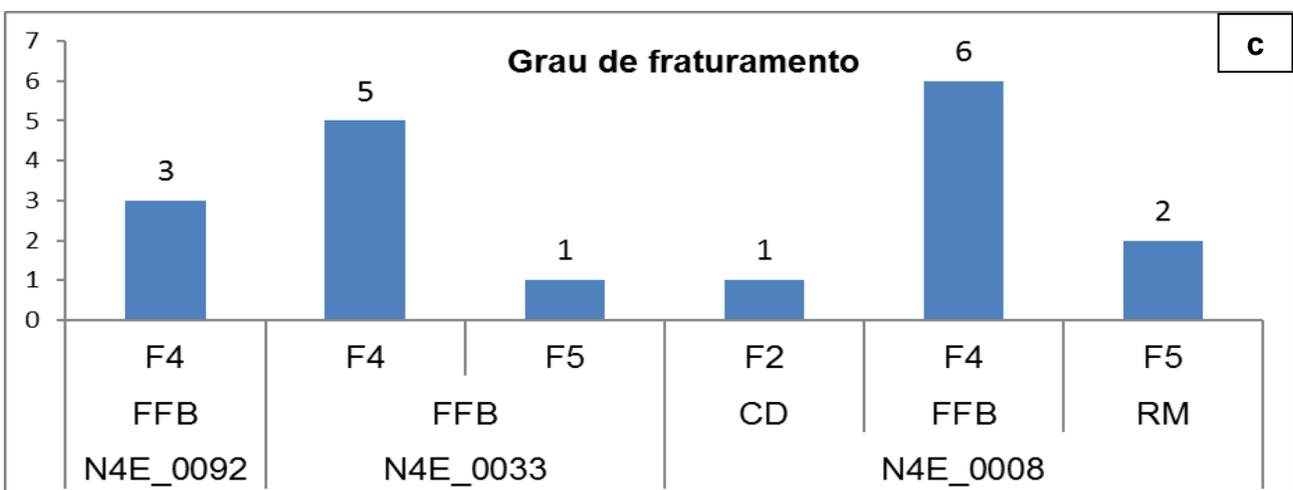
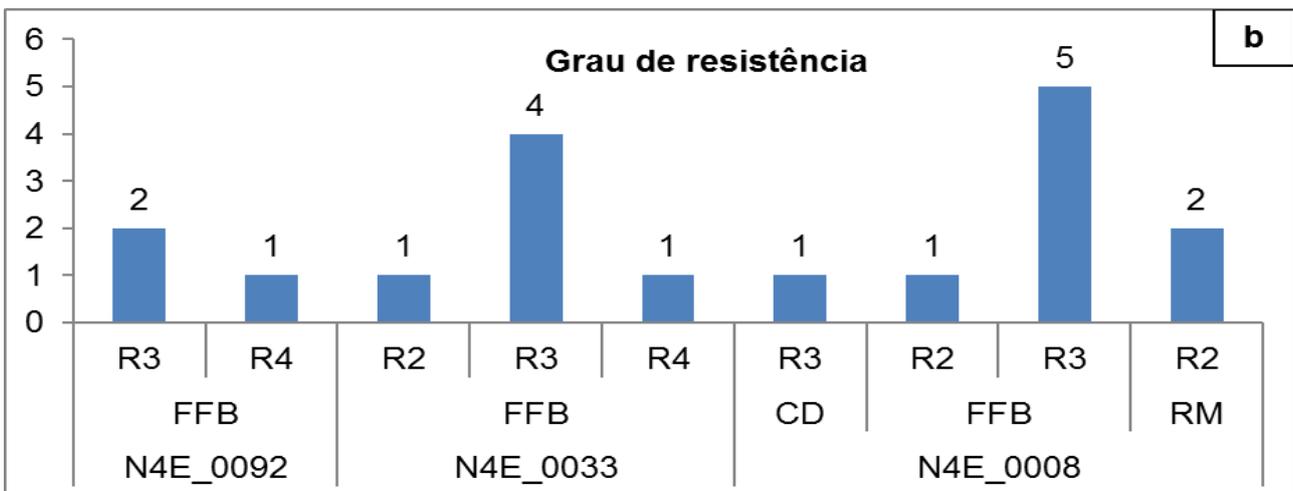
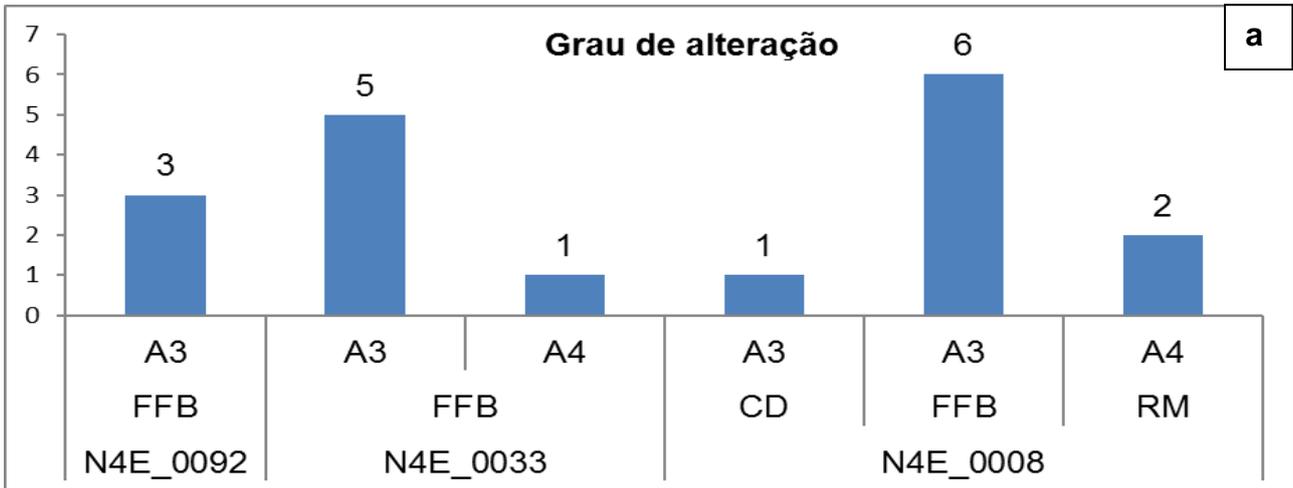
Figura 4: Aspectos texturais da FFL. a) bandamento persistente (cavidade N4E_0092); b) vazios entre bandas de óxido de ferro (cavidade N4E_0092); c) bandas de hematita fragmentadas e cimentadas evidenciando processos de laterização (cavidade N4E_0033) d) Dobras centimétricas no bandamento (cavidade N4E_0092).

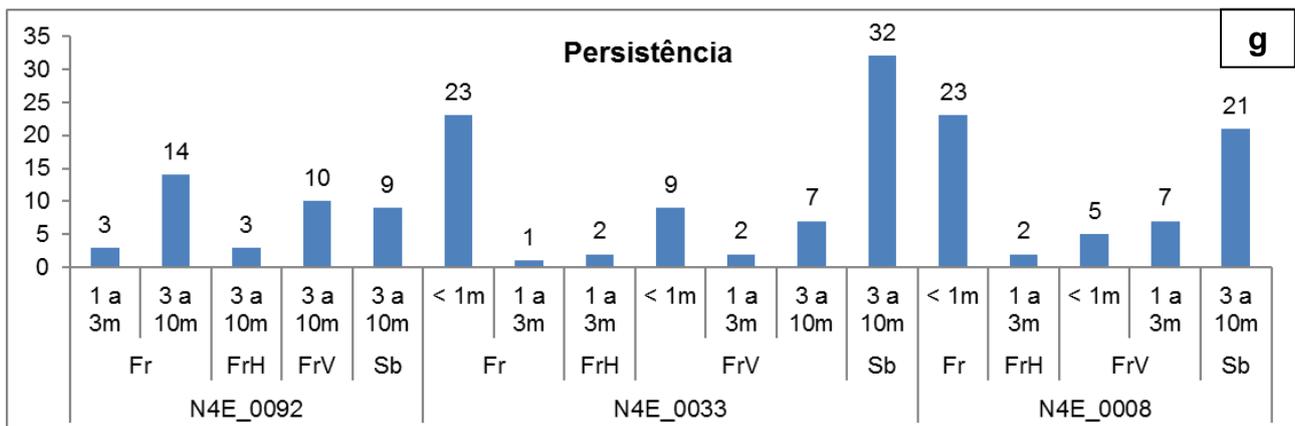
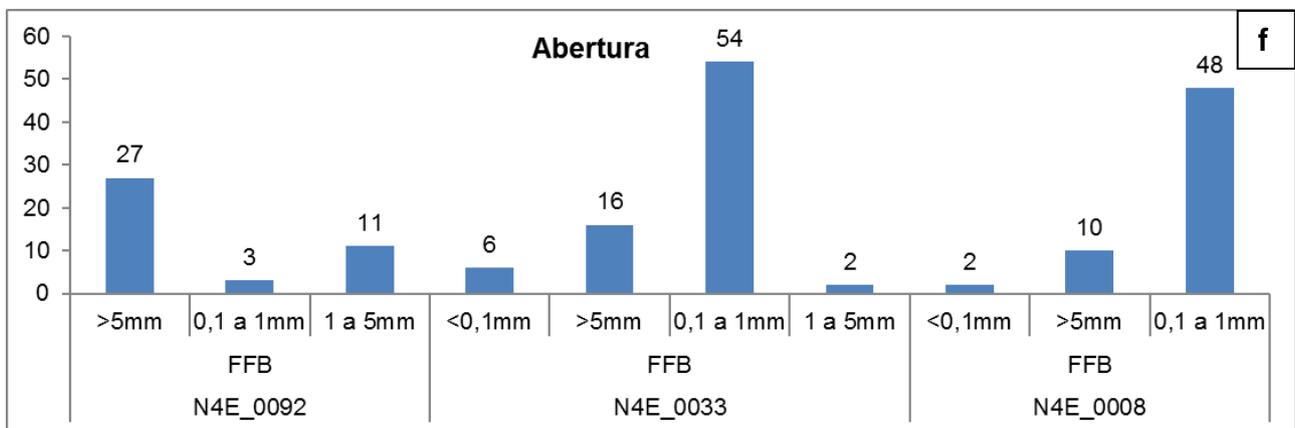
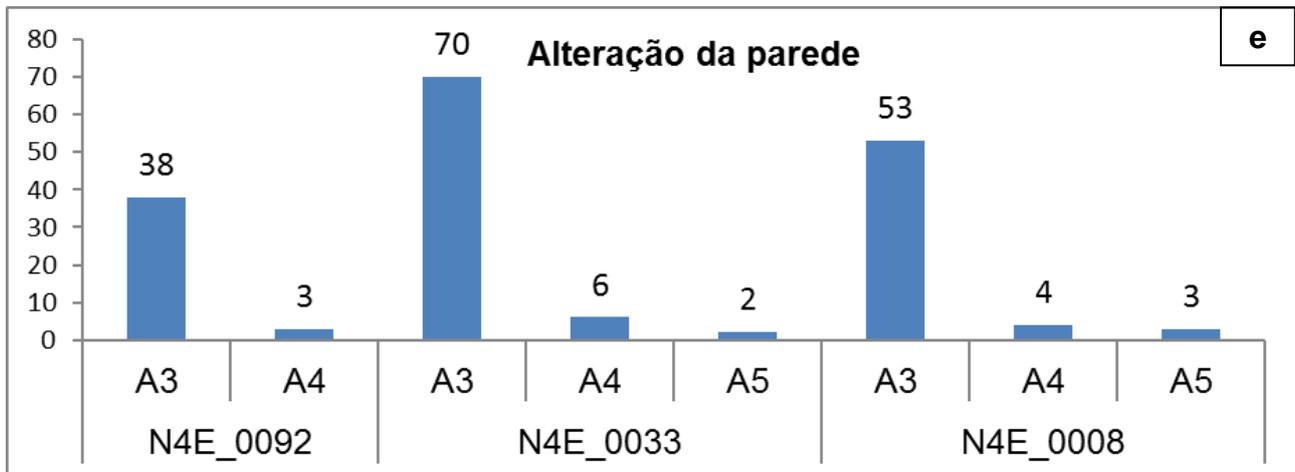
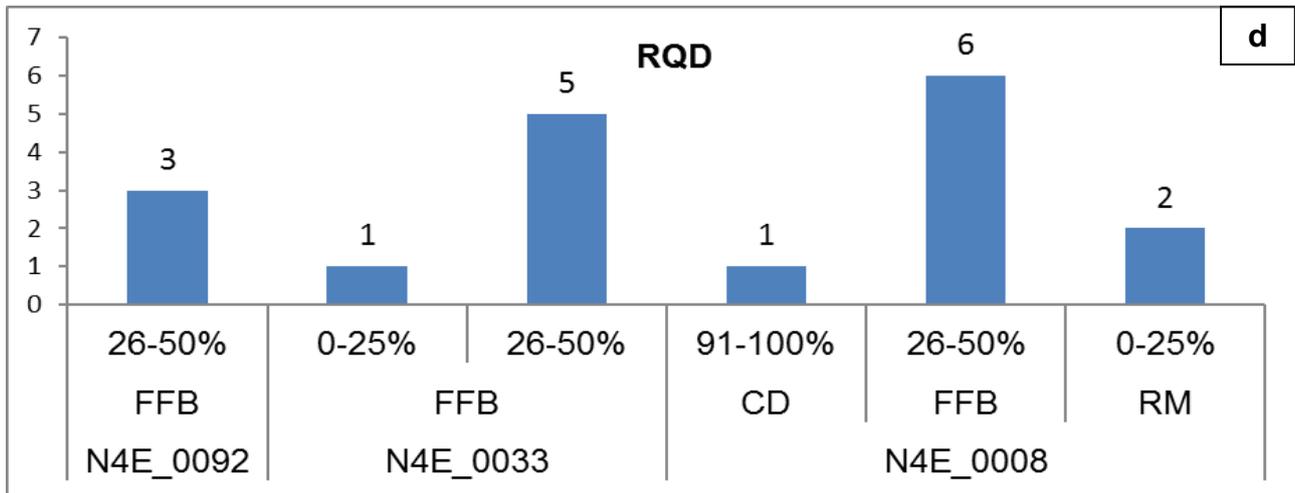
A baixa resistência do maciço nessas cavidades se deve principalmente: a) quando o material rochoso, que o constitui, tem baixa resistência em função do seu maior estado de alteração (A4); b) e quando a presença de um elevado número de fraturas ou outro tipo de descontinuidades (F₄) seja responsável por um comportamento de baixa resistência do maciço, mesmo que o material rochoso constituinte seja pouco alterado.

RQD

No estudo realizado observa-se uma fraca qualidade da rocha, onde a formação ferrífera mostra predomínio de RQD entre 26 a 50% (Figura 5d).

Os histogramas da figura 5 mostram dados obtidos dos pontos de mapeamento, incluindo as características dos litotipos principais e dos subordinados, quando presentes.





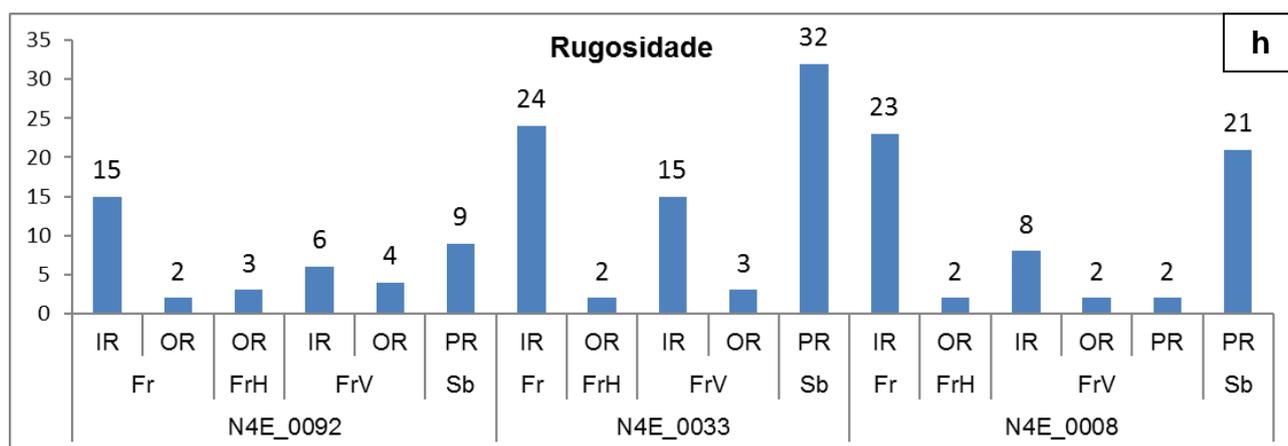


Figura 5: Histogramas representativos dos parâmetros geomecânicos das cavidades estudadas. a) Grau de alteração; b) Grau de resistência; c) Grau de faturamento; d) RQD; e) Alteração da parede; f) Abertura; g) Persistência e h) Rugosidade.

Condições das descontinuidades

A principal estrutura identificada no mapeamento foi o bandamento na formação ferrífera que se caracteriza pela persistência média (3-10m) e superfície planar rugosa (PR). Nos bandamentos são observadas duas direções principais, uma, segundo a direção NE-SW com mergulho baixo a moderado para NW (290/30), e outra orientação para NW-SE com mergulho moderado para SW (240/43) variando para NE (41/35) (Figura 6 estereogramas).

Os bandamentos são intersectados por duas famílias de fraturas principais, uma com direção NW-SE, e outra, aproximadamente paralela ENE-WSW, geralmente com mergulho moderado a alto para SE (165/57), conforme mostram os diagramas de rosetas (Figura 6-rosetas).

Ocorrem ainda em menor quantidade fraturas com mergulho sub-horizontal que mostram em geral persistência pouco contínua (1-3m) e superfície ondulada rugosa (OR) e fraturas subverticais com predomínio de estruturas de continuidade média (3-10m) nas cavidades N4E_0092 e N4E_0033 e persistência pouco contínuas (1-3m) para o caso da cavidade N4E_0008 (figura 5g), que apresentam em geral superfícies variando de irregular rugosa (IR) a ondulada rugosa (OR).

Algumas descontinuidades são abertas (>5 mm), com preenchimento de argila mole ou sem

nenhum preenchimento e a maioria é fechada (Figura 5f).

Condição hidrológica

As cavidades durante os trabalhos de campo mostraram-se seca. Embora, em períodos chuvosos podem ser observados indícios de presença de água, devido maior umidade e gotejamento principalmente nos terços distais, onde porções do maciço rochoso encontram-se mais argiloso (moderadamente alterado – A₃), provavelmente resultantes do processo de escoamento e infiltração de águas pluviais (Figura 5e). Um dos fatores que mais influenciam a resistência é a meteorização, uma vez que afeta as superfícies de descontinuidade da matriz rochosa, onde atuam os fenômenos de alteração (FERRER; VALLEJO, 1999).

4.2 Ensaio de resistência *in situ* (Esclerômetro de Schmidt- tipo L)

A determinação da resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso foi realizada de maneira indireta com o auxílio do esclerômetro portátil ou *martelo de Schmidt* (Figura 2). Para identificar as variações da resistência, foram distribuídos 31 pontos de ensaios *in situ* nas três cavidades estudadas (Figuras 7 a 9).

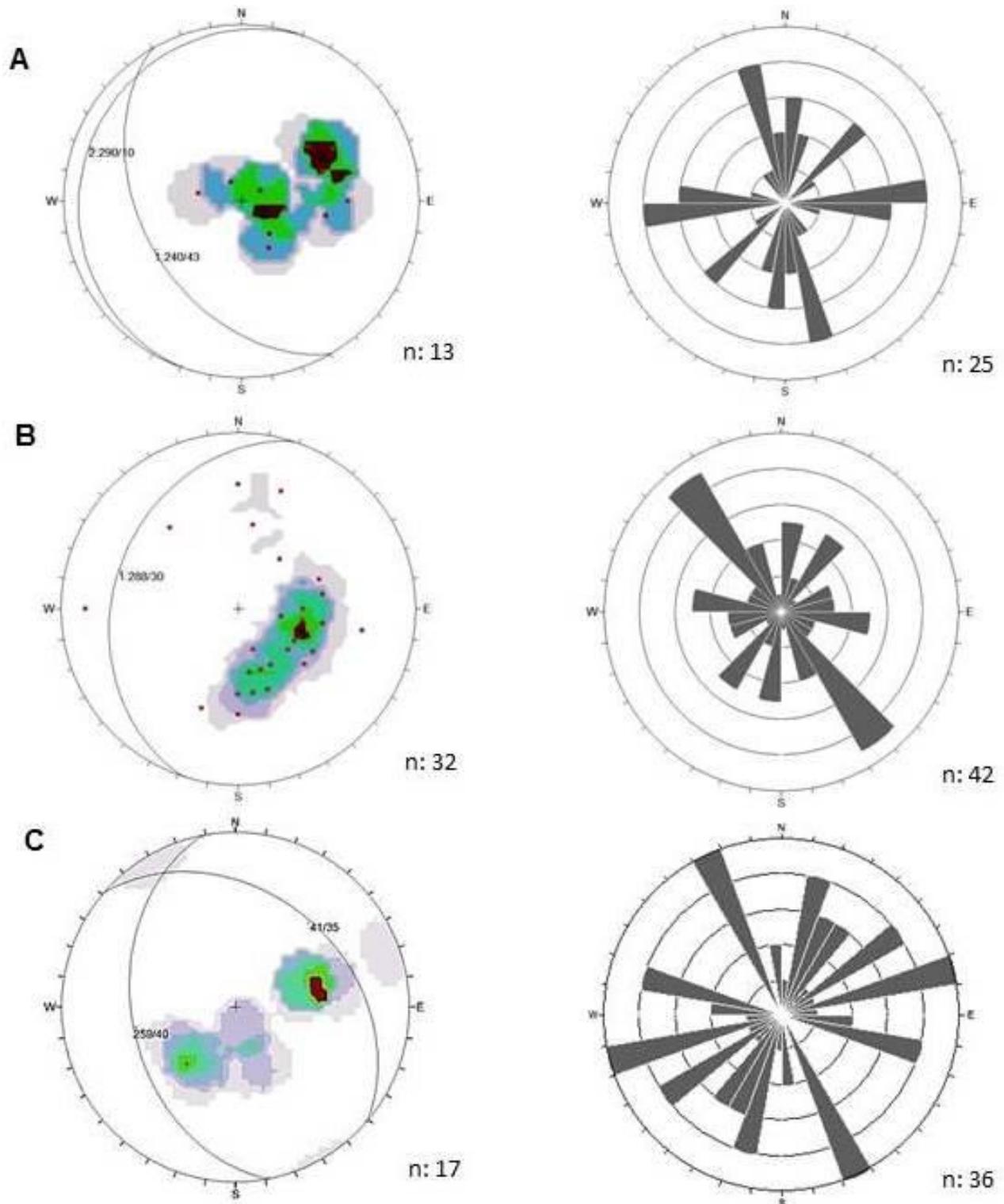


Figura 6: Diagramas de rosetas (gráficos à direita) da família de fraturas e estereogramas (gráficos à esquerda) dos bandamentos das cavidades estudadas: A) N4E_0092; B) N4E_0033 e C) N4E_0008.

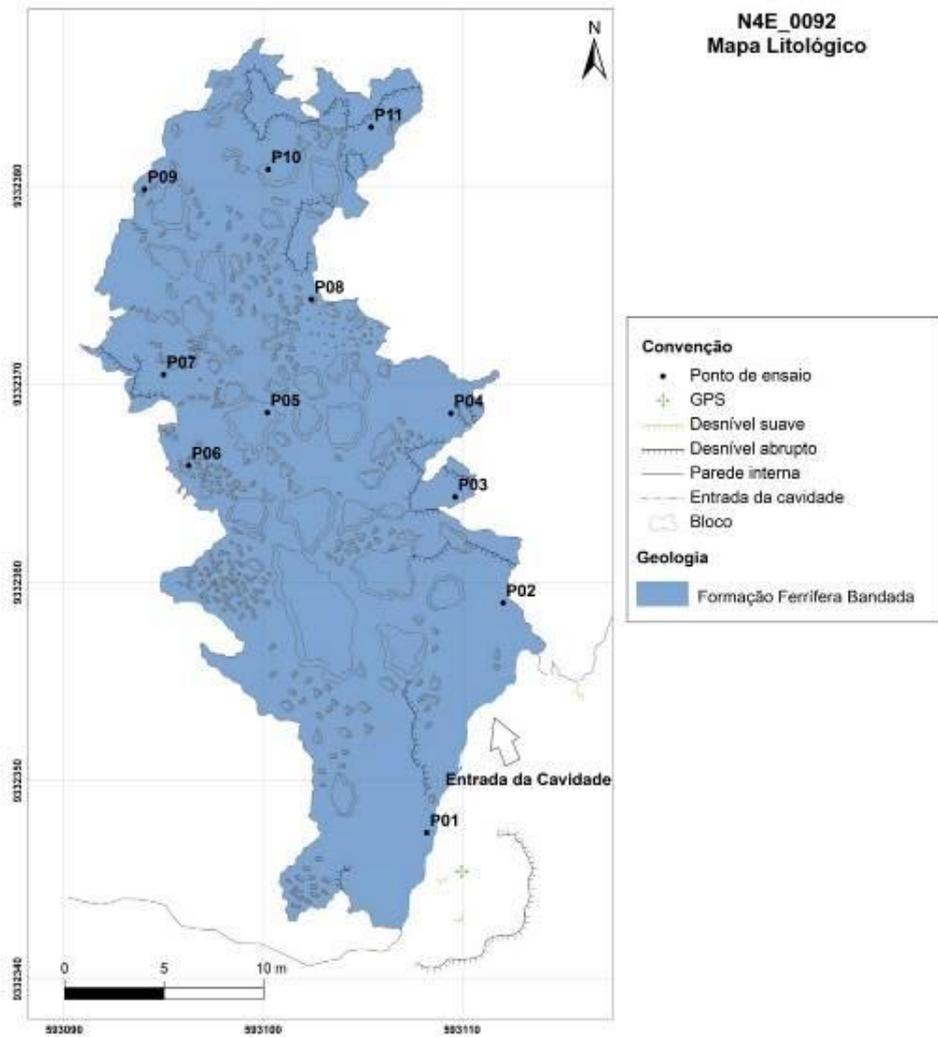


Figura 7: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0092.

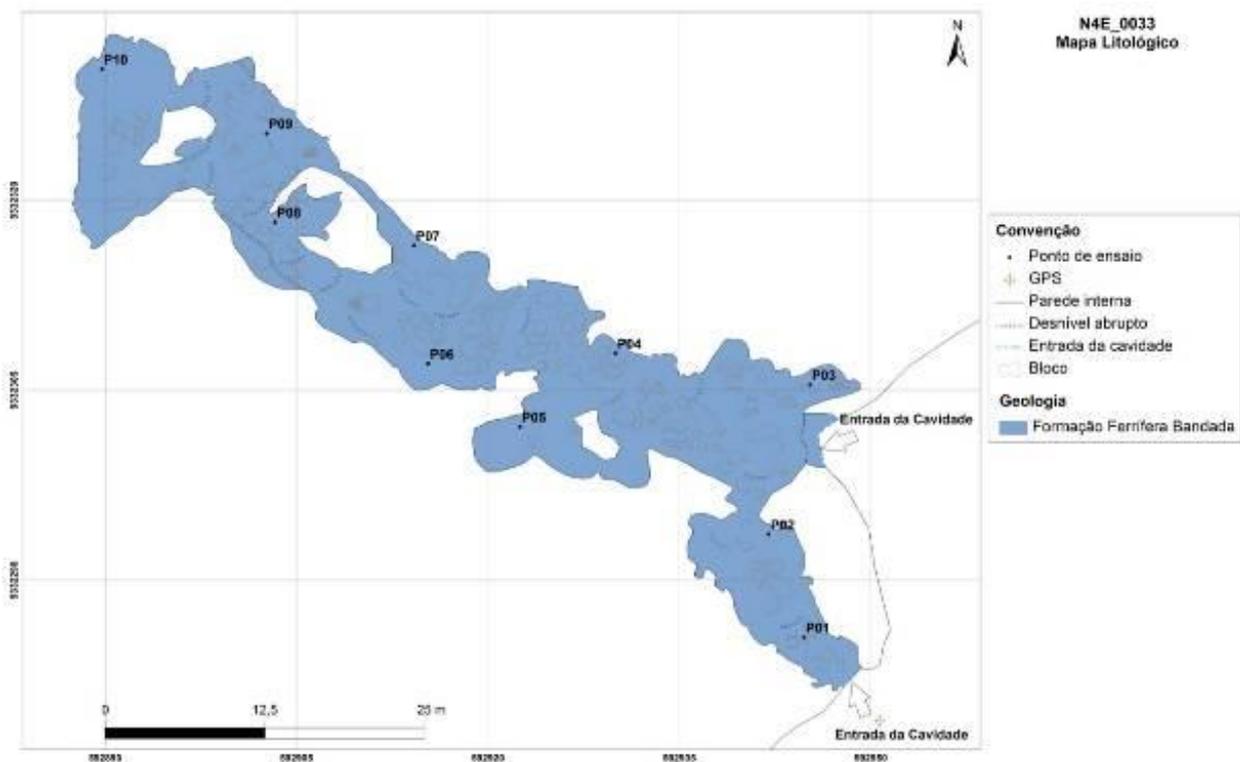


Figura 8: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0033.

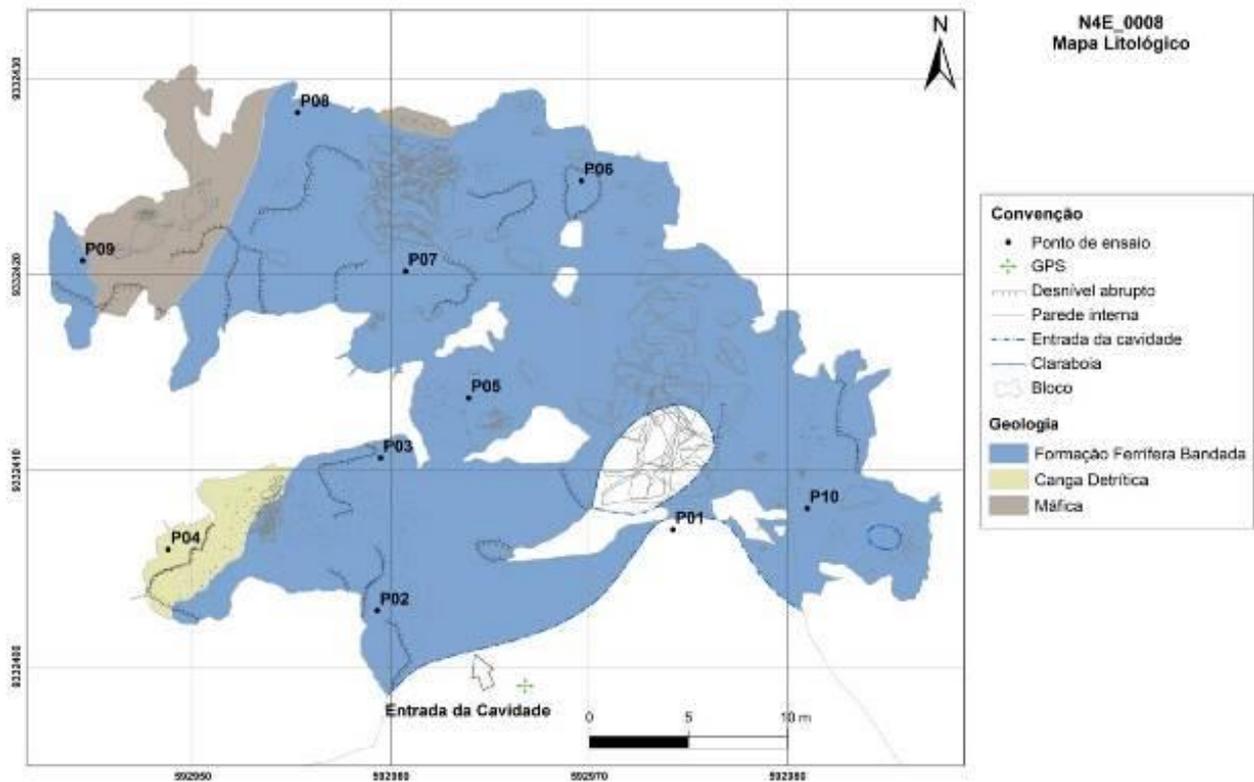


Figura 9: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0008.

A medição do ricochete foi correlacionada com a resistência do maciço, mediante o designado *ábaco de Miller*, que leva em conta a densidade da rocha (a formação ferrífera laterítica apresenta uma densidade média 31 kN/m³) e a orientação do martelo em relação a superfície da rocha ensaiada (perpendicular a superfície de ensaio).

Como referência da densidade, foram coletadas ao longo dos anos, amostras que dão suporte as estimativas de recursos minerais dos

projetos de minério de ferro em Carajás (ASSIS, 2013). Ao todo foram utilizados dados de 973 medidas de densidade (Tabela 6).

Foi realizada uma análise comparativa entre as estimativas da resistência na análise tátil-visual da formação ferrífera, e os valores quantitativos da resistência determinado em ensaio utilizando o martelo de Schmidt no mesmo material, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 7 a 9.

Tabela 6: Média dos valores de densidade para modelagem de dados aerogravimétricos gradiométricos (Assis, 2013).

Sigla	Litotipo	Densidade média (g/cm ³)
HC	Hematitito compacto	3,61
HF	Hematitito friável	3,12
HMN	Hematitito manganesífero	3,13
FMN	Formação ferrífera manganesífera	3,17
JP	Jaspilito	3,18
SO	Solo	2,03
CM	Colúvio/elúvio de hematitito laterizado	3,09
CQ	Lateritas	2,58
MD	Saprolito das rochas máficas, horizonte A/B	1,95
MSD	Saprolito das rochas máficas, horizonte C/R	2,34
MS	Rochas máficas indiferenciadas	2,58
QZ	Veio de Quartzo	2,47
AET	Arenito	2,62
CGL	Conglomerado	2,93

Tabela 7: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0092.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₄ (50-100)	39 R	110	Rocha muito resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	36 R	85	Rocha resistente
3	A ₃	R ₃ (25-50)	26,5 R	48	Rocha medianamente resistente
4	A ₃	R ₃ (25-50)	28 R	53	Rocha resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	24 R	41	Rocha medianamente resistente
6	A ₃	R ₃ (25-50)	25,5 R	44	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₃ (25-50)	22,5 R	37	Rocha medianamente resistente
8	A ₃	R ₃ (25-50)	21 R	32	Rocha medianamente resistente
9	A ₃	R ₂ (10-25)	22 R	35	Rocha medianamente resistente
10	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
11	A ₄	R ₃ (25-50)	25,5 R	44	Rocha medianamente resistente

Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m³

Tabela 8: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0033.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₄ (50-100)	28,5 R	54	Rocha resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
3	A ₃	R ₃ (25-50)	18 R	28	Rocha medianamente resistente
4	A ₃	R ₃ (25-50)	23,5 R	39	Rocha resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	14,5 R	22,5	Rocha branda
6	A ₃	R ₃ (25-50)	23 R	38	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₃ (25-50)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
8	A ₄	R ₂ (10-25)	17 R	27	Rocha medianamente resistente
9	A ₄	R ₂ (10-25)	14,5 R	22,5	Rocha branda
10	A ₄	R ₃ (25-50)	19 R	29	Rocha medianamente resistente

Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m³

Tabela 9: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0008.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₃ (25-50)	24 R	41	Rocha medianamente resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	36 R	85	Rocha resistente
3	A ₄	R ₂ (10-25)	13,5 R	21	Rocha branda
4	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
6	A ₃	R ₃ (25-50)	21,5 R	33	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₄ (50-100)	26 R	47	Rocha medianamente resistente
8	A ₃	R ₃ (25-50)	23,5 R	39	Rocha medianamente resistente
9	A ₄	R ₃ (25-50)	17 R	27	Rocha medianamente resistente
10	A ₄	R ₃ (25-50)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m ³					

Na análise dos resultados, nota-se que a cavidade **N4E_0092** apresenta a formação ferrífera mais resistente, sendo classificada em geral como rocha medianamente resistente (R3) com resistência a compressão uniaxial (σ_c) variando entre 25 e 50 Mpa, (conforme ISRM, 1981 - Tabela 7) e setores mais resistentes (R4) próximo à entrada da cavidade onde o ensaio apresenta valores de resistência cerca de 80 Mpa e 110 Mpa.

As cavidades **N4E_0033** e **N4E_0008** apresentam uma formação ferrífera com características geomecânicas diferentes em três setores da cavidade. Nos setores iniciais são classificados conforme a ISRM (1981) como uma rocha resistente (R4), com resistência a compressão uniaxial no intervalo entre 50 e 100 Mpa. A formação ferrífera medianamente resistente (R3) ocorre de forma predominante nas respectivas cavidades e apresenta resistência à compressão uniaxial (σ_c) entre 25 e 50 Mpa. Nos pontos 5 e 9 da cavidade **N4E_0033** (Tabela 8) e ponto 3 da cavidade **N4E_0008** (Tabela 9) a formação ferrífera é menos resistente, provavelmente devido a uma maior porosidade (influxo de água) e, ainda pela presença de pares conjugados de fraturas. Dessa forma, tais cavidades são classificadas neste setor de acordo com a ISRM (1981) como rocha branda de resistência a compressão uniaxial (σ_c) entre 10 e 25 Mpa.

Ressalta-se que no ponto (1) da cavidade **N4E_0008**, por vezes não foi possível obter valores

de rebote (sem leitura) em função da fragilidade do material encontrado. Irfan & Dearman (1978) aconselham que o esclerômetro de Schmidt só deva ser utilizado para materiais resistentes com um valor de ricochete (R) superior a 40. No entanto, Hencher & Martin (1982) defende o uso do martelo de Schmidt como índice para toda a gama de estados de alteração do material. Propõem, ainda, que a inexistência de valor de ricochete (R), pode ser usada para definir o limite entre o estado muito alterado e o estado completamente alterado, mas apenas no caso dos materiais *in situ*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que mesmo em caráter preliminar, este estudo de caracterização representou bem a geologia local em ambientes ferríferos, e forneceu boa aproximação das condições de qualidade do material rochoso, o que pode auxiliar nos estudos geoespeleológicos exigidos pela legislação vigente no que diz respeito à estabilidade estrutural das cavidades durante a aproximação da lavra em regiões de cavidades. Sendo importante o conhecimento da resistência do maciço mediante as vibrações para o planejamento e controle das premissas de desmonte (cargas e distancias).

As principais contribuições técnicas deste trabalho foram:

Ω Os dados apresentados mostram uma ótima correlação entre a análise tátil-visual e o ensaio

utilizando o martelo de Schmidt, onde a resistência à compressão uniaxial através do esclerômetro de Schmidt no maciço rochoso mostrou em média valores de 25-50 Mpa para as zonas medianamente alteradas e resistentes (A3/R3) e, cerca de 10-25 Mpa nas zonas mais alteradas e menos resistentes (A4/R2). Estes valores se encontram dentro do limite do índice de resistência estabelecido pela ISRM.

- Ω Observou-se que a direção principal de desenvolvimento (prolongamento e alargamento) das cavidades e/ou condutos maiores, segue preferencialmente, a interseção entre o bandamento e duas principais famílias de fraturas (NE-SW e NW-SE). A resistência da formação ferrífera foi influenciada pela anisotropia da direção que será determinante para a estabilidade do maciço, principalmente em condições onde o plano de anisotropia se encontre alterado, representando pontos de fraqueza do maciço rochoso;

Ω A formação ferrífera laterítica em termos de qualidade geotécnica apresentou um grau de fraturamento elevado (F4) que geralmente implica no comportamento de baixa resistência do maciço, mesmo que o material rochoso constituinte seja pouco alterado.

- Ω A circulação de água no maciço rochoso por meio de estruturas como fraturas, foliações e dobras, tem papel fundamental na alteração heterogênea da formação ferrífera, resultando numa maior porosidade do material, tornando-se conseqüentemente mais friável e menos coesivo, sendo um dos fatores que mais influenciam na resistência das cavidades e, indicando zonas com maior fragilidade geotécnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale S.A. pela autorização na divulgação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, L. M. **Geração de Modelo Exploratório para o Minério de Ferro da Província Mineral de Carajás Através da Integração de Dados Multiforme**. 2013. 154p. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de Brasília. Brasília.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. **Rock Mechanics**, v.6, n.4, p.189-236, 1974.
- BARTON, N.; GRIMSTAD, E. The Q-system following twenty years of application in NMT support selection. **GEOMECHANICS COLLOQUY**, 43, Salzburg. **Anais**. Felsbau, 1994. p.428-436.
- BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251 p.
- BRAGA, A. A. J; FIORI, A. P.; COSTA, F. R. Influência estrutural sobre cavidades em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, v.25, n.1, p.24-39, 2017.
- BRANDI, I.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R. Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás- PA. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA**, 33, Eldorado. **Anais**. Campinas: SBE, 2015. p.627-634. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_627-634.pdf. Acesso em: 24 abr. 2018.
- BVP ENGENHARIA LTDA. **Mapeamento litoestrutural e geomecânico da mina N4E - Serra dos Carajás/PA**. Carajás: (Relatório interno nº BVP: 2.01.02.100-E-RT-020), 2009. 88p.
- DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering classification and index properties for intact rock**. 1.ed. New Mexico: University of Illinois. Report AFWL-TR-65-116, 1966. 300 p.
- DEERE, D. U.; HENDRON, J. R.; PATTON, F.D.; CORDING, E. J. Design of surface and near surface construction in rock. In failure and breakage of rock. **FAILURE AND BREAKAGE OF ROCK SYMPOSIUM**, 8, New York. **Anais**. New York, 1967. p.237-302.

- FERRER, M.; VALLEJO, L. **Manual de Campo para la Descripción y Caracterización de Macizos Rocosos en Afloramientos**. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, ISBN: 84-7840-387-6, 1999. 83 p.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2.ed. Curitiba: Editora UFPR, 2009. 604 p.
- GONÇALVES, D. F.; DE PAULA, R. G.; BARBOSA, M. R.; TELES, C.; MAURITY, C. W.; MACAMBIRA, J. B. Lateritic terrains and the evolution of pseudokarstic features- case study in the iron ore mine N4E, Carajás region – Pará, Brazil. WORLD MINING CONGRESS, 24, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 2016. p.227-236.
- GONTIJO, A.; SILVA FILHO, A.; REIS, F.; MALAQUIAS, I.; MARTINS, P.; GOMES, R. Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 6, Goiânia. **Anais**. Goiânia: COBRAMSEG, 2014. p.1-8.
- HENCHER, S. R.; MARTIN, R. P. The description and classification of weathered rocks in Hong Kong for engineering purposes. SOUTHEAST ASIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 7, Hong Kong. **Anais**. Hong Kong, 1982. p.125-142.
- HOEK, E.; BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. 3.ed. rev. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p.
- HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W.F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Rotterdam: Balkema, 1995. 215 p.
- HOEK, E.; CARTER, T. G.; DIEDERICHS, M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart. ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 47, San Francisco. **Anais**. San Francisco, 2013. p.1-9.
- IBAMA nº 887. **Delibera sobre o patrimônio espeleológico nacional e delimita a área de influência das cavidades naturais**. Brasília: Diário Oficial da União, 1990. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br>. Acesso em: 23 Abr. 2018.
- IRFAN, T. Y; DEARMAN, W. R. The engineering petrography of weathered granite in Cornwall, England. **Quartely Journal Engineering Geology**, v.11, n.3, p.233-244, 1978.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom**, v.15, n.6, p.319-368, 1978.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. Basic geotechnical description of rock masses. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom**, v.18, n.1, p.85-110, 1981.
- MARINOS, P.; HOEK, E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. PROCEEDINGS GEOENG2000 CONFERENCE, 01, Melbourne. **Anais**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 2000. p.1422-1442.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resolução CONAMA nº 347: Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico**. Brasília: Diário Oficial da União, 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- PRIEST, S. D. **Discontinuity analysis for rock engineering**. London: Chapman & Hall, 1993. 470 p.
- VIEIRA, V.; BRITO, S. N. A.; LOPES, T. C.; FARIA, B. T. Caracterização geológico-geotécnica e Classificação geomecânica. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15. Bento Gonçalves. **Anais**. Bento Gonçalves: ABGE, 2015. p.1-9.

VILES, H; GOUDIE, A.; GRAB, S.; LALLEY, J. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. **Earth surface processes and landforms**, v.36, n.3, p.320-333, 2010.

Fluxo editorial:

Recebido em: 21.06.2019

Aprovado em: 02.10.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp
