

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**IDENTIFICAÇÃO DE *CHARCOAL* COMO EVIDÊNCIA DA  
OCORRÊNCIA DE PALEOINCÊNDIOS NO TRIÁSSICO DA BACIA DO  
PARANÁ**

**DAIANE DOS SANTOS CARDOSO**

ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki

Porto Alegre – 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**IDENTIFICAÇÃO DE *CHARCOAL* COMO EVIDÊNCIA DA  
OCORRÊNCIA DE PALEOINCÊNDIOS NO TRIÁSSICO DA BACIA DO  
PARANÁ**

**DAIANE DOS SANTOS CARDOSO**

ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Isabela Degani-Schmidt

Dra. Marleny Blanco Gonzáles

Dr. Anderson José Maraschin

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para a obtenção do Título de  
Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2017

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Cardoso, Daiane dos Santos

Identificação de charcoal como evidência da ocorrência de paleoincêndios no Triássico da Bacia do Paraná. / Daiane dos Santos Cardoso. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.  
[70 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es): Ana Maria Pimentel Mizusaki

1. Carvão Vegetal. 2. Paleoincêndios. 3. Petrografia. Orgânica  
4. Microscopia Eletrônica de Varredura. I. Título.

CDU 550.4

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências pela oportunidade de realização deste trabalho, e ao Programa Petrobras de Formação de Recursos Humanos (PFRH), pelo fomento a pesquisa e pela bolsa de mestrado.

Aos meus orientadores, Ana Maria Mizusaki, Rualdo Menegat e Margot Guerra-Sommer pela disponibilidade e atenção que tornaram esse trabalho possível.

À Margot pela orientação, incentivo e entusiasmo. Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda dela.

Aos professores Wolfgang Kalkreut e João Graciano pelas análises, ao técnico Luiz Flávio Lopes pelas fotografias e à colega Patricia Zacca pela ajuda com as figuras.

À toda minha família pelo apoio e incentivo. À minha mãe pela paciência e dedicação, minha avó Eunice, Nina e Diego pelo carinho e atenção.

À minha irmã Caroline e as minhas amigas Carolina e Rosalia por me ajudarem com a revisão final do trabalho.

Às minhas amigas Helga, Sabrina, Rosalia e Carolina pelas conversas e por nunca me deixarem desistir.

Aos meus colegas e amigos Carlinhos, Adriano e Rodrigo por toda atenção, apoio e cafés.

Aos demais colegas e amigos da estratigrafia pela boa convivência e contribuições.

Muito Obrigada a todos!

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.*

Isaac Newton

## RESUMO

Pela primeira vez incêndios florestais são identificados em uma associação de fácies contendo a Flora *Dicroidium* nos sedimentos avermelhados do Triássico Médio (Ladiniano) na parte sul da Bacia do Paraná (Formação Santa Maria, Rio Grande do Sul). A extensão geográfica dessa assembleia de plantas foi, assim, estendida no Gondwana brasileiro. As análises por petrografia orgânica, fluorescência, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de varredura (tipo *field emission gun* - MEV-FEG) revelaram a presença recorrente de carvão vegetal (*charcoal*) na sucessão vertical de fácies relacionadas a um modelo deposicional de fluxos efêmeros de baixa densidade do tipo inunditos. O carvão microscópico (*micro-charcoal*) ocorre como fragmentos comuns em diferentes fácies, enquanto que o carvão vegetal macroscópico (*macro-charcoal*) é representado por espécimes tridimensionais de lenhos atribuídos a gimnospermas (Pinaceae?) e por fragmentos achatados, finos e alongados atribuídos a pteridospermas (rachises de *Dicroidium?*). Os valores médios de reflectância da inertinita entre 2,80-6,61 %Ro medidos nos fragmentos de *macro-charcoal* evidenciaram processos de queima de alta temperatura, envolvendo tanto incêndios na copa quanto na interface copa-superfície. A recorrência de fragmentos queimados em várias fácies do perfil estudado indica a ocorrência de incêndios regionais que afetaram tanto as comunidades meso-xerófilas distais quanto às associações proximais higro-mesófilas, compostas majoritariamente por espécimes da Flora *Dicroidium*. A integração dos resultados obtidos a partir das múltiplas análises dos fragmentos de *charcoal* é consistente com um teor de oxigênio atmosférico superior a 20%.

**Palavras-chave:** Petrografia Orgânica, Microscopia Eletrônica de Varredura, Carvão Vegetal Macroscópico, Carvão Vegetal Microscópico, Paleoincêndios, Sedimentos avermelhados.

## ABSTRACT

For the first time wildfires are reported from an association of different facies containing a *Dicroidium* flora from the Middle Triassic (Ladinian) red beds in the southern part of the Paraná Basin (Santa Maria Formation, Rio Grande do Sul state). The geographical extension of the *Dicroidium* plant assemblage has thus been extended in the Brazilian Gondwana. Analyses through petrography, fluorescence microscopy, scanning (SEM) and field emission gun scanning electron microscopy (FEG-SEM) revealed recurrent charcoal presence in a vertical facies succession of depositional cycles related to ephemeral prograding low density flows. Microscopic charcoal occurs as common fragments within different facies whereas macroscopic charcoal is represented by tridimensional wood specimens assigned to gymnosperms (Pinaceae?) and by flattened, thin, elongated remains assigned to pteridospermophytes (rachises of *Dicroidium*?). Average reflectance values between 2.80-6.61 %Ro measured in the macro-charcoals evidenced burning processes of high temperature, involving fires both in the crown and in the crown-surface interface. The recurrence of charcoal in several facies of the studied profile indicates regional wildfires, which affected hinterland, meso-xerophyllous coniferous assemblages and marginal hygro-mesophyllous *Dicroidium*-like assemblages. The integration of results obtained from the multiple charcoal analyses is consistent with atmospheric oxygen content higher than 20%.

**Key-words:** Organic Petrography, Scanning Electron Microscopy, Micro-charcoal, Macro-charcoal, Paleowildfires, Red Beds.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e do perfil colunar descrito (modificado de Borsa, 2015). .....	10
Figura 2. Tipos de incêndios e de combustível. A) Incêndios de superfície. B) Incêndios de dossel. C) Incêndios subterrâneos (Extraído de Scott, 2000). .....	14
Figura 3. Arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná com a área de estudo destacada em vermelho (modificado de Milani & Ramos, 1998). .....	19
Figura 4. Carta cronoestratigráfica da Bacia do Paraná (extraída de Milani <i>et al.</i> , 2007). .....	20



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Dimensões de fragmentos carvão vegetal segundo os critérios de Scott, 2010. \* Fragmentos reconhecíveis à vista desarmada (extraído de Ribeiro, 2015). .12

## SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT .....	II
LISTA DE FIGURAS .....	III
LISTA DE QUADROS .....	IV
PREÂMBULO:.....	VII
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1.    Objetivos Específicos.....	9
1.2.    Localização da Área de Estudo.....	9
1.3.    Estado da Arte: uma síntese .....	11
2. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO .....	18
2.1.    Bacia do Paraná.....	18
2.2.    Supersequência Gondwana II .....	21
3. METODOLOGIA .....	23
3.1.    Levantamento Bibliográfico .....	23
3.2.    Campo e Amostragem .....	23
3.3.    Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-FEG).....	24
3.4.    Petrografia Orgânica .....	24
3.5.    Fluorescência.....	25
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26
5. RESULTADOS OBTIDOS .....	33
5.1.    Carta de Submissão.....	33
5.2.    Artigo Submetido ao periódico internacional <i>Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology</i> . .....	34
1 INTRODUCTION.....	35
2 GEOLOGICAL SETTING AND SOURCE STRATA .....	36
3 MATERIAL AND METHODS .....	41

4 RESULTS.....	43
4.1 GENERAL ASPECTS OF THE MEGAFLORA.....	43
4.2 CHARCOAL ANALYSES .....	45
5 DISCUSSION.....	53
6 CONCLUSIONS.....	58
ACKNOWLEDGMENTS.....	59
REFERENCES.....	59

## PREÂMBULO:

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo: **Extensive wildfires in Triassic (Ladinian) Dicroidium Flora of South Brazilian Paraná Basin**, submetido ao periódico internacional *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Desta forma, a estruturação deste trabalho compreende as seguintes partes:

- 1) Introdução sobre o tema da dissertação e os objetivos a serem desenvolvidos no trabalho, localização da área de estudo e revisão dos principais trabalhos que abordam a importância do charcoal no registro geológico e a sua utilização em paleoambientais, na inferência de teores de gases paleoatmosféricos e na vinculação com fatores climáticos;
- 2) Contexto geológico da área de estudo;
- 3) Breve descrição das técnicas e métodos utilizados para o desenvolvimento desse estudo;
- 4) Artigo científico submetido ao periódico *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*;
- 5) Conclusões da presente dissertação.

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal (*charcoal* sensu Scott & Damblon, 2010) é produzido em incêndios naturais (Kuhlbusch & Crutzen, 1996; Schmitd & Noack, 2000) e representa a combustão incompleta de matéria vegetal. Dada a sua resistência a oxidação ou decomposição, e sua capacidade de flutuação, fragmentos de carvão vegetal (*charcoal*) são preservados *in situ* ou podem ser transportados a longas distâncias antes de serem incorporados aos sedimentos. Assim, fragmentos de carvão vegetal podem ser reconhecidos não somente em sedimentos terrestres, mas também em sedimentos costeiros, marinhos rasos e até em marinhos profundos (Forbes *et al.*, 2006; Power *et al.*, 2010). A presença de *charcoal* em estratos geológicos indica a ocorrência de incêndios florestais desde o Siluriano (Glasspool *et al.*, 2004) até o Quaternário em diversos ambientes (Glasspool *et al.*, 2004; MacDonald *et al.*, 1991; Scott, 1989, 2000, 2010; Scott & Glasspool, 2006).

No Gondwana brasileiro, fragmentos dispersos de *charcoal* são muito comuns em níveis clásticos associados a camadas de carvão a partir do intervalo transgressivo basal da Bacia do Paraná, nos estratos carvão do Permiano (Formação Rio Bonito, Sakmariano-Artinskiano) ao longo das bordas norte e sul da bacia (Degani-Schmidt *et al.*, 2015; Jasper *et al.*, 2013). A presença desses fragmentos queimados também é registrada em “*bonebeds*” do último ciclo progradacional relacionado a completa continentalização do grande lago confinado que ocupou a área no Permiano (Formação Rio do Rastro) (Manfroi *et al.*, 2015).

Em relação ao Triássico, afloramentos de quase todas as sequências *triássicas* da bacia do Paraná, que se restringem à região sul do Brasil, foram investigados em busca de evidência de incêndios florestais, porém, até o momento, fragmentos de *charcoal* estavam ausentes. Contudo, através de mapeamentos regionais na região sul do estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente na região do Gráben Arroio Moirão, considerado como um relicto da Bacia do Paraná no Escudo Sul-Rio-Grandense, foi possível a identificação, coleta e caracterização de fragmentos de *charcoal* e de uma associação vegetal compatível com a Flora *Dicroidium*, registrada pioneiramente para a bacia do Paraná por Bortoluzzi *et al.* (1985) e até o presente restrita a afloramentos da região central do estado (Afloramento Passo das Tropas e adjacências).

A presença desses fragmentos dentro dos estratos mapeados indica a ocorrência de incêndios florestais durante o Triássico Médio na região sul da Bacia do Paraná. Adicionalmente, através da descoberta de abundantes impressões vegetais da Flora *Dicroidium* e através de correlações estratigráficas é possível associar as rochas mapeadas a Sequência Santa Maria I (Zerfass *et al.*, 2003), além de estender a ocorrência geográfica desta associação paleoflorística.

Portanto, levando em consideração estas recentes descobertas, o objetivo principal deste trabalho foi a identificação e caracterização do *charcoal* e a inferência paleoambiental estabelecida a partir dos resultados obtidos pela presença desses fragmentos queimados nos sedimentos triássicos dos relictos, em específico, o Gráben do Arroio Moirão da Bacia do Paraná no Escudo Sul-Rio-Grandense.

### **1.1. Objetivos Específicos**

O presente estudo tem como objetivos (1) descrever, identificar e caracterizar o carvão vegetal (*charcoal*), através da utilização de distintas técnicas analíticas; (2) definir a intensidade dos incêndios vegetacionais com base em parâmetros de petrografia orgânica; (3) correlacionar os resultados obtidos com curvas estimadas de O<sub>2</sub> atmosférico para o intervalo estudado; (4) caracterizar as impressões vegetais da Flora *Dicroidium* e estender sua ocorrência geográfica no Gondwana brasileiro; (5) estabelecer uma interpretação paleoambiental para o intervalo estudado em um contexto regional com base nos resultados obtidos em análises paleobotânicas e de *charcoal*, associados aos dados faciológicos.

Os dados produzidos através do levantamento de campo e das diversas técnicas analíticas utilizadas poderão, no futuro, ser integrados aos dados publicados para o Triássico de bacias distintas, para que seja possível uma melhor compreensão sobre intensidade de eventos de incêndio e concentração de O<sub>2</sub> na atmosfera em escala global no Mesozoico.

### **1.2. Localização da Área de Estudo**

O trabalho foi realizado na região do Gráben Arroio Moirão, que se encontra situado no Escudo Sul-Rio-Grandense, entre as cidades de Santana da Boa Vista e

Canguçu no estado do Rio Grande do Sul. O gráben (Figura 1) é uma depressão de forma alongada com 30 km x 95 km na direção N30°E, balizada por falhas com orientação NE-SW. No seu limite leste, ocorre a Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu (Zona de Falha Dom Feliciano) e, no oeste, a Zona de Falha Açotéia – Piquiri. Supõe-se que o conjunto destas falhas NE-SW tenha sido herdado do embasamento e, posteriormente, sofrido reativação, gerando assim a atual estruturação. Nesta região, unidades *triássicas* da Bacia do Paraná se encontram preservadas sobre o embasamento, os denominados relictos da porção sul da Bacia.

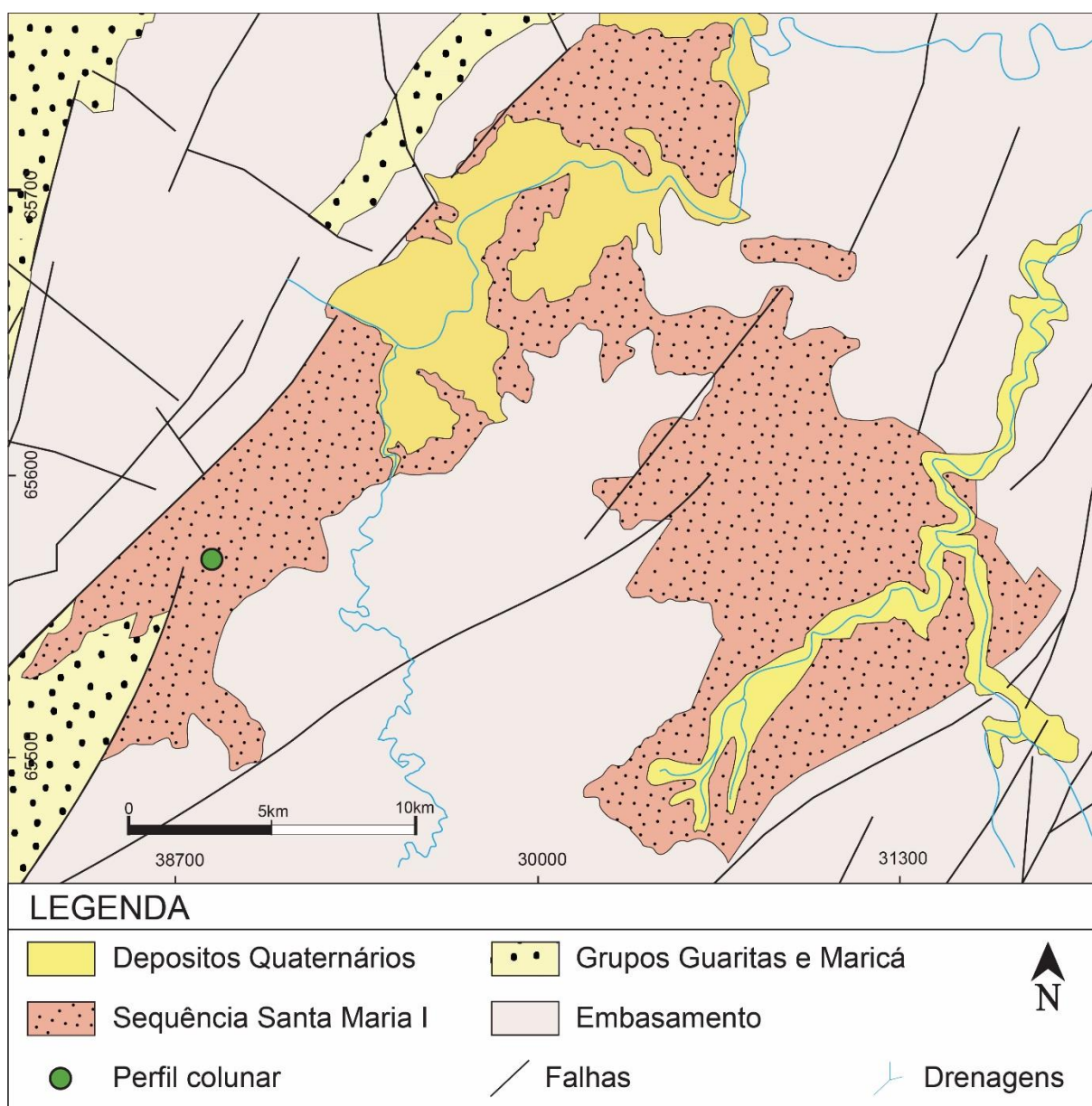


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e do perfil colunar descrito (modificado de Borsa, 2015).

### 1.3. Estado da Arte: uma síntese

O *charcoal* ou carvão vegetal é onipresente no registro fóssil, com uma história que remonta ao Siluriano (Glasspool *et al.*, 2004). Dado que eventos extensivos de incêndio atualmente alteram o equilíbrio de muitos ecossistemas terrestres, a análise integrada de diferentes parâmetros paleoambientais e a interação destes com eventos de incêndio durante a história da Terra oferecem indicativos sobre a evolução de padrões, regionais ou globais, de umidade e ressecamento e a mudança relativa na concentração de gases atmosféricos (Kuhlbusch & Crutzen, 1996; Schmitd & Noack, 2000)

As únicas evidências diretas para caracterizar a ocorrência de paleoincêndios são obtidas a partir da análise de carvão vegetal fóssil, da inertinita e de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos pirogênicos (Abu Hamad *et al.*, 2012). A grande maioria dos carvões vegetais são produtos de incêndios provocados por descargas elétricas relacionadas a relâmpagos, porém, alguns tipos são gerados a partir da ignição por atividade vulcânica (Kemp, 1981; Rössler & Sterzeleanum, 2001; Scott *et al.*, 2000, 2003). A atribuição de grandes incêndios e consequente modificação de paisagem por causas antrópicas a partir do Quaternário tem sido defendida por diferentes autores. Para o sul do Brasil Bheling *et al.* (2005) atribuem às populações indígenas a origem de grandes incêndios que teriam alterado a composição de associações vegetais no Holoceno.

A produção de carvão vegetal é resultado da combustão incompleta de vegetais. No entanto, partes de animais, preferencialmente invertebrados, também podem se preservar como carvão vegetal (Scott *et al.*, 2000). Segundo Gutsell & Johnson (2007) para que exista a combustão, é necessária a ação conjunta de três elementos básicos: oxigênio, fonte de ignição e material combustível, formando o chamado triângulo do fogo.

No processo de queima, a planta é submetida a um aquecimento rápido que provoca o colapso da celulose nos tecidos, produzindo voláteis como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> que se misturam à atmosfera e queimam (Pyne *et al.*, 1996). Essa reação aumenta o aquecimento e perpetua o fogo. O aquecimento atinge os tecidos vegetais, onde não existe praticamente oxigênio, em reação de pirólise. O colapso das moléculas libera gases voláteis que entram em combustão ao entrarem em contato com o oxigênio.



Se essa reação é interrompida antes da completa combustão, fragmentos de carvão vegetal são deixados como resíduo (Scott, 2010).

Entre as temperaturas de 20 e 110 °C, o lenho absorve calor, é ressecado, emitindo vapor úmido. Entre 100 e 270 °C, os traços finais de água são liberados e o lenho começa a se decompor, liberando monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido ascético e metanol. A decomposição exotérmica do lenho inicia entre 270 e 290 °C, com a contínua liberação de gases mistos e de betume. Entre 290 e 400 °C, o domínio de alcatrão começa a predominar à medida que a temperatura aumenta (McParland *et al.*, 2007).

A transformação de lenho em carvão vegetal completa-se aos 400°C, quando ainda são encontrados apreciáveis teores de alcatrão (aproximadamente 30%) (Beaumont, 1985). Os fragmentos perdem massa durante o processo, e reduzem consideravelmente seu peso e dimensões (McParland *et al.*, 2007; Lupia, 1995). Os domínios de carbono na parede celular se ordenam, tornando o tecido mais resistente a degradação (Ascough *et al.*, 2010).

Scott (2010) define três tipos básicos de fragmentos de carvão vegetal com base em suas dimensões (Quadro 1):

**Quadro 1 Dimensões de fragmentos carvão vegetal segundo os critérios de Scott, 2010. \* Fragmentos reconhecíveis à vista desarmada (extraído de Ribeiro, 2015).**

<b>Carvão vegetal macroscópico*</b>	<b>Carvão vegetal mesoscópico*</b>	<b>Carvão vegetal microscópico</b>
Carvão vegetal macroscópico* - maior do que 1 mm	Carvão vegetal mesoscópico* - 180 µm até 1 mm	Carvão vegetal microscópico - menor do que 180 µm

Experimentos desenvolvidos por Clark & Patterson (1997) concluíram que o transporte de carvão vegetal microscópico pelo vento é muito efetivo e em um contexto interpretativo, refletem dados regionais, enquanto que carvões vegetais macroscópicos estão relacionados a incêndios de caráter mais local. O carvão vegetal microscópico (menor do que 180 µm) é geralmente originado a partir da combustão de vegetação viva e também de serapilheira (Peters & Higuera, 2007), enquanto que a produção e dispersão de carvão vegetal macroscópico (maior 1 mm) é mais intensa em florestas (Eckmeier *et al.*, 2007a, 2007b).

Nos sistemas florestais, a produção de carvão vegetal depende de dois fatores: combustível e natureza do incêndio. Dessa forma, podem ocorrer, de forma

independente ou mesmo continuada: (i) incêndios de dossel, que se propagam a partir dos caules em direção à copa das árvores; (ii) incêndios de superfície, atingindo a vegetação herbácea e arbustiva além da folhada, que pode atingir também a copa das árvores e (iii) incêndios subterrâneos ocorrem em nível de raízes (Figura 2).

Em incêndios de dossel são produzidas grandes quantidades de carvão vegetal microscópico (Figura 2), enquanto que a produção de carvão vegetal macroscópico é reduzida (Pyne *et al.*, 1996). Estudos desenvolvidos em incêndios vegetais e em experimentos acompanharam o deslocamento do carvão vegetal microscópico por ação do vento. Esses estudos comprovaram que partículas maiores precipitam antes que as menores e diferentes partículas podem ser transportadas a distâncias oceânicas (Peters & Higuera, 2007). Nesse contexto, pode-se considerar que carvões vegetais microscópicos refletem dados regionais (Clark & Patterson, 1997), enquanto que os macroscópicos refletem dados mais locais.

A água constitui o meio de transporte mais efetivo de carvão vegetal macroscópico; chuvas associadas a tempestades podem transportar grandes quantidades desses fragmentos e sedimento por fluxos superficiais até sistemas fluviais (Scott, 2010). Uma associação composta exclusivamente por fragmentos equidimensionais de carvão vegetal indica seleção no transporte. Já, a composição heteromorfa e heterodimensional compreendendo diferentes tipos e tamanhos de fragmentos incluindo carvão macroscópico (<1 mm) mesoscópico (180  $\mu\text{m}$  a 1 mm) e microscópico (>180  $\mu\text{m}$ ) indica proximidade da área fonte do incêndio.

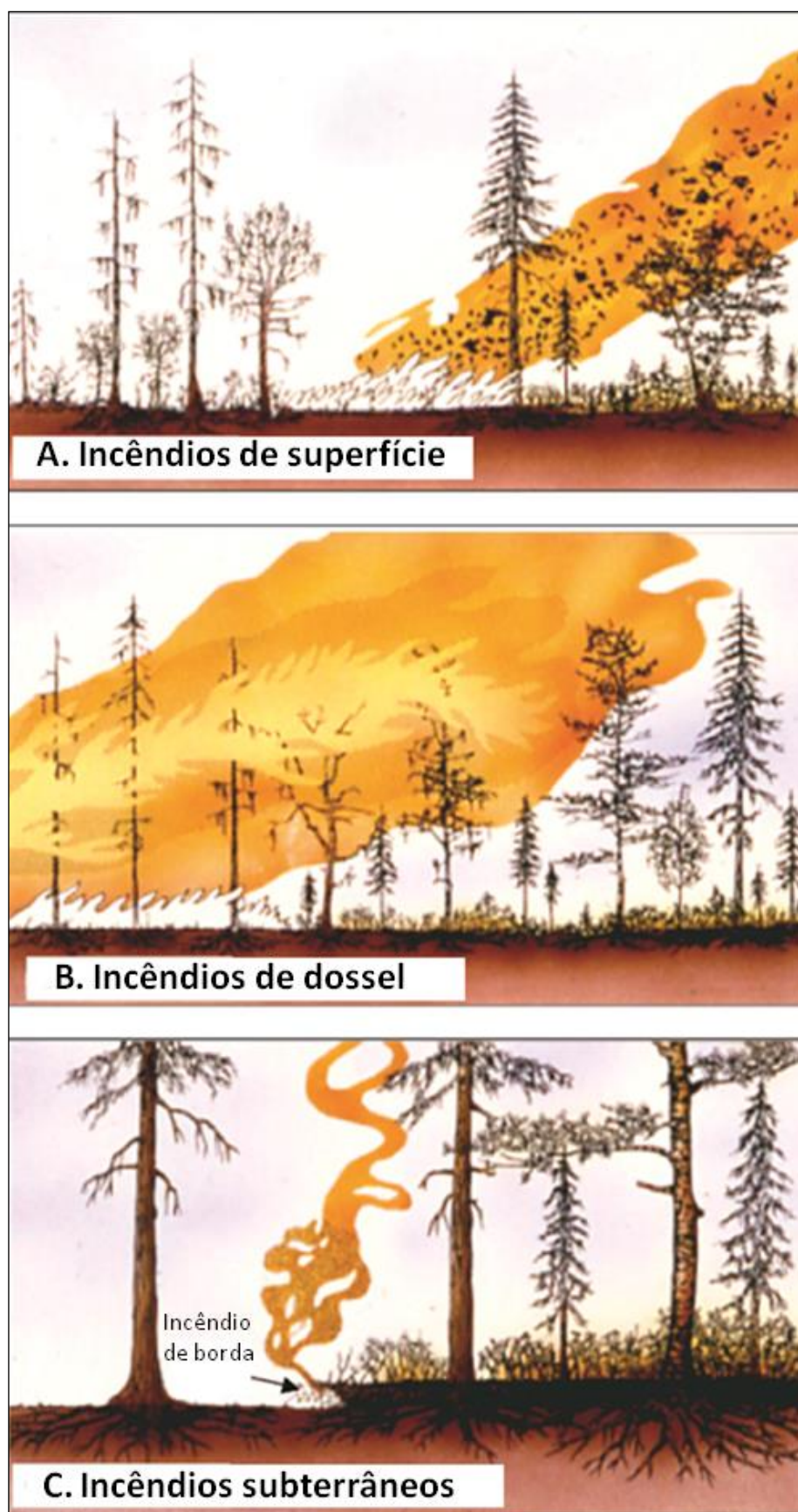


Figura 2. Tipos de incêndios e de combustível. A) Incêndios de superfície. B) Incêndios de dossel. C) Incêndios subterrâneos (Extraído de Scott, 2000).

A distinção entre fragmentos queimados e não queimados é estabelecida com base na preservação de paredes celulares, utilizando-se Microscopia Eletrônica de Varredura. Apenas quando a parede celular está homogeneizada pode-se afirmar que um fragmento é carvão vegetal e se este passou por temperaturas superiores a 325 °C. É possível, entretanto, que apenas partes externas dos lenhos estejam carbonizadas, enquanto que as internas permanecem inalteradas (Jones, 1993). Esse processo ocorre frequentemente em caules de grande porte em incêndios de florestas.

Fragmentos de carvão vegetal são encontrados em muitos tipos de rochas, mas são mais comumente encontrados em rochas sedimentares (Scott, 1989). Observa-se que, pela sua resistência a oxidação ou decomposição e pela sua capacidade de flutuação, fragmentos de *charcoal* são preservados *in situ* ou podem ser transportados a longas distâncias antes de serem incorporados aos sedimentos. Assim, fragmentos de carvão vegetal podem ser reconhecidos não somente em sedimentos terrestres, mas também em sedimentos costeiros, marinhos rasos e até em marinhos profundos (Forbes *et al.*, 2006; Power *et al.*, 2010).

Apesar de carvões vegetais serem comuns, a sua distribuição ao longo do tempo geológico é variável. Evidências de incêndios vegetacionais são detectadas desde o Siluriano expandindo-se até o Eo-Devoniano (Scott & Glasspool 2006). Embora registros mais antigos afirmem uma baixíssima ocorrência de incêndios no Mesodevoniano (Scott & Glasspool, 2006), estudos mais recentes tem demonstrado uma dramática ascensão de incêndios no final do Devoniano, estimando tores de O<sub>2</sub> mais significativos que os atuais (Glasspool *et al.*, 2015).

De acordo com Scott (2000), a partir do Carbonífero inferior, há o registro de extensos depósitos de *charcoal* que evidenciam a ocorrência de incêndios florestais significativos e generalizados. No Carbonífero superior, o carvão vegetal era comum ou abundante em uma ampla gama de fácies, especialmente aquelas relacionadas a depósitos de carvão na província Euramericana (mais raramente em Cataíisia e Angara).

De acordo com Glasspool (2000), os incêndios eram parte integral dos ecossistemas de turfeiras gondwânicos de latitudes médias a altas, sendo registrados em todos os continentes. Na última década, especificamente nas sequências gondwânicas brasileiras, tem sido gerada uma base importante de dados sobre *charcoal* macroscópico nos estratos carvão do Permiano ao longo das

bordas norte e sul da bacia, na Formação Rio Bonito (Sakmariano-Artinskiano) (Degani-Schmidt *et al.*, 2015; Jasper *et al.*, 2013), e em camadas do último ciclo progradacional relacionado a completa continentalização do grande lago confinado que ocupou a área no Permiano, na Formação Rio do Rastro (Manfroi *et al.*, 2015).

Entre o final do Paleozoico e estágios iniciais do Mesozoico poucos registros de carvão vegetal podem ser observados. Entretanto, importantes depósitos dos estágios finais do Mesozoico são encontrados globalmente. A ocorrência desses fragmentos tem sido amplamente relatada a partir de sedimentos terciários. De acordo com Scott (2000) sua presença no Quaternário e Recente não é apenas resultado da ocorrência de incêndios por influência antrópica, mas consequência de eventos resultantes de diferentes eventos cíclicos de alteração de padrão climático regional ou global.

A distribuição desigual de carvão ao longo do tempo geológico, e sua quase ausência em determinados intervalos, tem levado a pesquisadores a indicar a ocorrência de “*charcoal gaps*” em determinados intervalos (Retallack *et al.*, 1996; Veevers *et al.*, 1994).

Especificamente para o Triássico inferior e médio, os registros publicados sobre carvão vegetal como prova direta de paleoincêndios florestais eram muito escassas até recentemente (Belcher & McElwain, 2008; Scott, 2000; Uhl *et al.*, 2008, 2010). Esses dados levaram a uma ausência global de carvão vegetal (“*global gap*”) que teria vigorado do Induano inferior ao Carniano (Retallack *et al.*, 1996; Veevers *et al.*, 1994).

Durante muito tempo, especulou-se que uma suposta falta de evidência para os incêndios durante esse intervalo possa ser explicada por uma grande queda na concentração de oxigênio atmosférico, após ou durante o evento de extinção em massa, no final do Permiano, impedindo a ocorrência de incêndios vegetacionais (Abu Hamad *et al.* 2012). Diferentes modelos geoquímicos (Berner, 2001, 2005; Berner & Canfield, 1989) sugeriram que as concentrações de oxigênio foram inferiores 12-13% durante o Eo e Meso Triássico, e que tais baixas concentrações de oxigênio atmosférico podem ter impedido a ignição e a propagação de incêndios de forma eficaz (Robinson, 1989, 1991; Scott, 2000). Contudo, o crescente reconhecimento de registros de carvão vegetal em sedimentos Triássicos em todo o mundo não corrobora esse modelo, principalmente porque a ocorrência de incêndios

significativos é incompatível com a previsão de intervalos prolongados de baixos níveis atmosféricos de O<sub>2</sub> (Tanner & Lucas, 2016).

Estudos prévios de Abu Hamad *et al.* (2012) consideram que diversos fatores integrados podem ter gerado a ausência ou depressão de carvão vegetal. Tais fatores estariam relacionados, além das predições de baixos teores de O<sub>2</sub>, a peculiaridades do processo tafonômico, a ausência de sedimentos adequados para a preservação do carvão vegetal macroscópico (dada a ocorrência maciça de *red beds*), e a escassez de material combustível (baixa densidade de florestas).

Por outro lado, a desatenção dos cientistas em reconhecer características de queima em fragmentos vegetais no campo constitui um fator importante, que influencia na recuperação de evidências de fogos durante este período (Abu Hamad *et al.*, 2012; Scott, 2010). Dessa forma, segundo Abu Hamad *et al.* (2012), com base em evidências geológicas, esta ausência ou redução de carvão vegetal inferida para Triássico inferior e médio não deve ser, necessariamente, interpretada como uma ausência ou redução do número de incêndios.

Registros recentes sobre a ocorrência de incêndios no Triássico da Argentina, Alemanha e Jordânia tem ampliado o reconhecimento da ocorrência de incêndios expressivos durante esse intervalo de tempo (Colombi & Parrish, 2008; Uhl *et al.*, 2010; Abu Hamad *et al.*, 2012). Isto corrobora com as inferências de Abu Hamad *et al.* (2012), sobre a extensão de tais eventos no início do Mesozoico, a repercussão dessas evidências na estimativa de O<sub>2</sub> atmosférico, e a sua influência no desenvolvimento da vida em ambiente terrestre.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1. Bacia do Paraná

A sucessão estudada neste trabalho compreende as rochas triássicas que ocorrem na Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná (Figura 3) é uma bacia sedimentar intracratônica, que se desenvolveu do Paleozoico ao Mesozoico (Figura 4) no supercontinente Gondwana. Atualmente, engloba áreas geograficamente situadas no continente sul-americano, incluindo porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproxima dos 1.5 milhões de quilômetros quadrados (Milani *et al.*, 2007).

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura máxima de em torno dos sete mil metros (Milani *et al.*, 2007). Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná seis unidades de ampla escala ou Supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Figura 3). Cada supersequência representa um intervalo de dezenas de milhões de anos, controlados por superfícies de discordância de caráter inter-regional (Milani *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2013).

Relictos da Supersequência Gondwana II são observados sobre as unidades do Escudo Sul-Rio-Grandense seguindo estruturas geotectônicas herdadas do Pré-Cambriano e reativadas no Triássico. Os relictos, também denominados como “registro estratigráfico gonduânico” preservados sobre o Escudo Sul-Rio-Grandense - ESRG, têm idade sugerida como sendo *triássica*, e são correlacionáveis com a Bacia do Paraná (Jost, 1981; Faccini, 1989, 2000; Menegat & Scherer, 1993; Horn *et al.*, 2014; Lima, 2016).

Milani (1997) discute que durante o Triássico ocorreu uma distensão generalizada na porção sul do *Gondwana* onde teria se depositado a Supersequência *Gondwana* II. Essa Supersequência tem uma ocorrência restrita aflorando somente nas porções gaúcha e uruguaia da bacia. Seu registro sedimentar é característico e preservado em bacias tipo gráben, como por exemplo, o Gráben Arroio Moirão, onde dominam sedimentos pelíticos-arenosos de cor

avermelhada. Para Zeffass *et al.* (2003), o Triássico caracterizou-se por um nível de base relativamente baixo, clima árido e semiárido, e uma sedimentação continental.

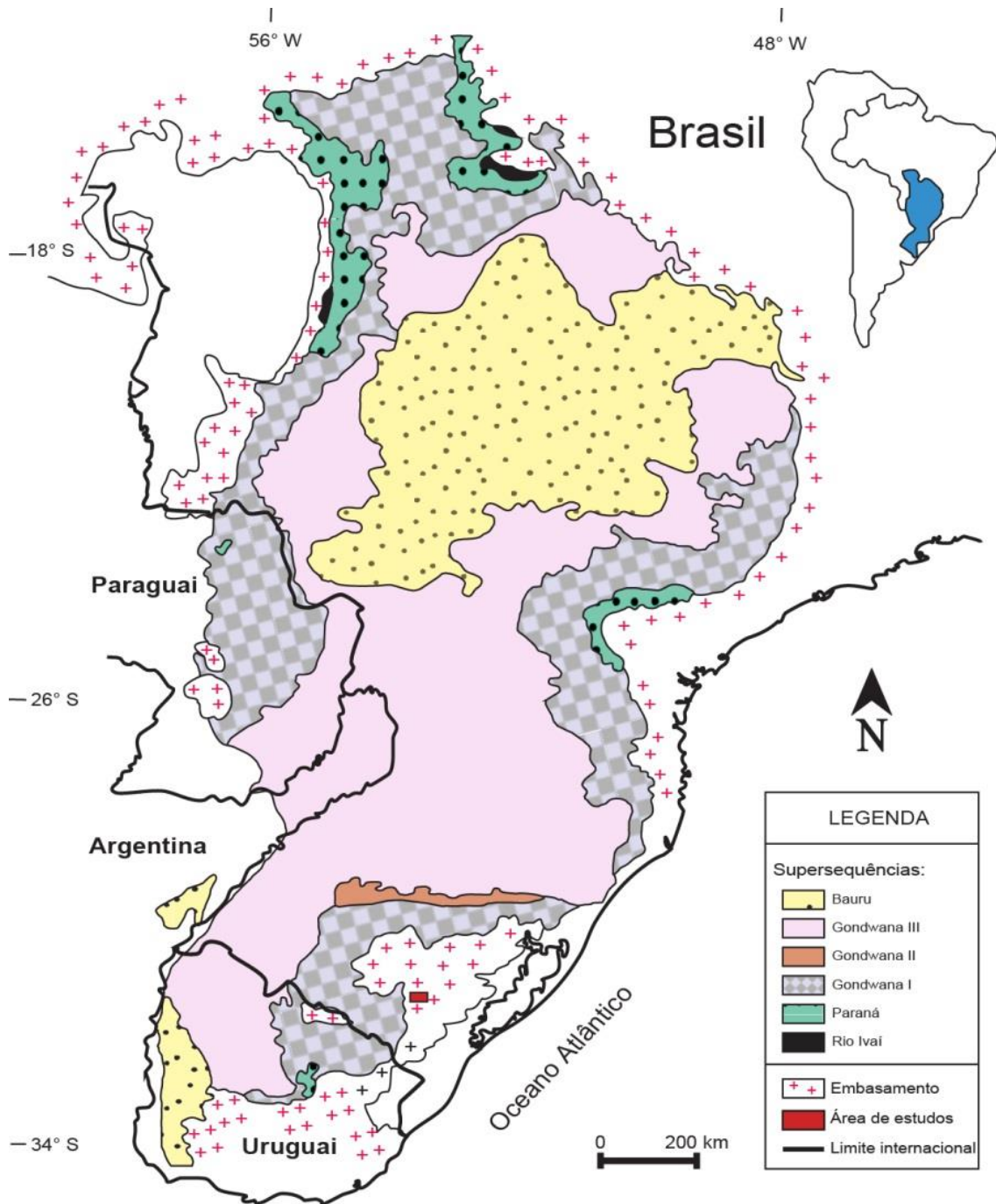


Figura 3. Arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná com a área de estudo destacada em vermelho (modificado de Milani & Ramos, 1998).



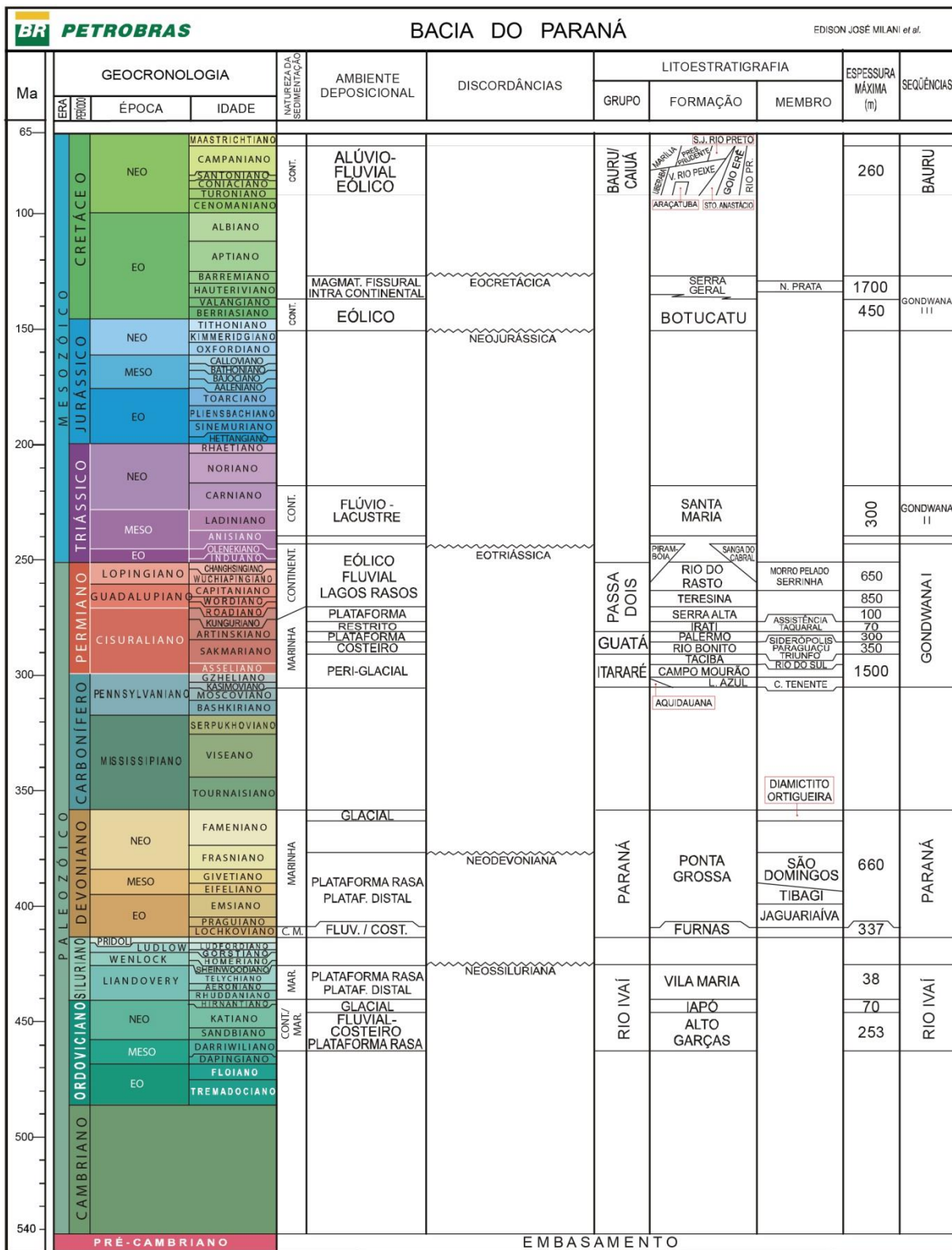


Figura 4. Carta cronoestratigráfica da Bacia do Paraná (extraída de Milani *et al.*, 2007).

## 2.2. Supersequência Gondwana II

A Supersequência Gondwana II, objeto do presente estudo, é representada pela unidade sedimentar triássica denominada Formação Santa Maria. Zerfass *et al.* (2003, 2004) caracterizou, com base em dados regionais, duas sequências de deposição de segunda ordem na sucessão continental do Sul do Brasil: Sanga do Cabral (Triássico Inferior) e Santa Maria (Triássico Médio a Triássico Superior).

A Sequência Santa Maria é composta por três sequências de terceira ordem (Zerfass *et al.*, 2003). Na base, a Sequência Santa Maria I (SMSI) compreende conglomerados suportados por clastos e arenitos cruzados, sobrepostos por *mudstones* laminados. Esta associação de fácies foi interpretada como passagem fluvial para depósitos superficiais lacustres. A Sequência Santa Maria II (SMSII) é composta de arenitos de granulometria média a fina, arenitos com estratificação cruzada e lentes de *mudstones* na base, que foram interpretados como depósitos fluviais de alta sinuosidade. A porção superior da SMSII exhibe uma sucessão granocrescente ascendente composta por ritmitos (siltito-argilito) intercalados com lentes de arenitos de granulação fina, com estratificação cruzada ou acanalada, depositados em um sistema lacustre-deltaico. A Sequência Santa Maria III (SMSIII) é constituída por arenitos estratificados e conglomeráticos, com abundantes troncos silicificados. Litoestratigraficamente, as sequências SMSI e SMSII correspondem às Formações Santa Maria e Caturrita, e SMSIII corresponde à Formação Mata (Zerfass *et al.*, 2003).

A primeira subdivisão bioestratigráfica proposta para a Formação Santa Maria é apresentada por Barberena & Bortoluzzi (1977), quando foram reconhecidas três cenozonas: *Therapsida*, *Rhynchocephalia* e *Dicroidium*. As duas primeiras foram baseadas em répteis, enquanto que a cenozona *Dicroidium* foi baseada no domínio desse gênero em densas associações de impressões vegetais fósseis. Através da correlação de fauna argentina *triássica* com a Formação Santa Maria, os autores propuseram o posicionamento destas cenozonas entre o Mesotriássico e Neotriássico.

Guerra-Sommer *et al.* (1999) e Guerra-Sommer & Cazzulo-Klepzig (2000) realizaram o detalhamento taxonômico das associações megaflóricas inclusas na Formação Santa Maria na região central do estado do Rio Grande do Sul. Tendo em vista as ocorrências restritas a um único nível estratigráfico, e o caráter local das

ocorrências, foi proposto um intervalo florístico informal denominado de Flora *Dicroidium odontopteroides* (Anisiano superior a Ladiniano superior), comparável a fitoassociações dominadas por pteridospermas do gênero *Dicroidium* diagnosticadas em intervalos temporais e nichos ecológico distintos para o Triássico da Austrália (Retallack, 1977).

### 3. METODOLOGIA

O presente estudo centrou-se na descrição e caracterização dos fragmentos de carvão vegetal macroscópico e microscópico, realizadas através dos dos itens citados a seguir.

#### 3.1. Levantamento Bibliográfico

A etapa de levantamento bibliográfico desenvolveu-se até o final da presente dissertação e incluiu a seleção de artigos técnico-científicos nacionais e internacionais, monografias, dissertações e teses que discutem a identificação, caracterização e modelos que explicam a presença de *charcoal* e suas implicações ambientais. Paralelamente, também foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a Bacia do Paraná, a Formação Santa Maria, o Gráben Arroio Moirão e o Triássico. Nesta etapa ainda foram realizadas as seleções de fotos aéreas, das imagens de satélite e dos mapas topográficos da região selecionada para o estudo.

#### 3.2. Campo e Amostragem

Para a realização da etapa de campo na região do Gráben do Arroio Moirão (RS), utilizou-se a técnica de mapeamento geológico de Lisle (2014). Durante o mapeamento, foi levantado um perfil colunar de detalhe que, por sua vez, foi identificado como PGM-B10. A espessura total desse perfil colunar é aproximadamente 50 m.

No perfil colunar, após a identificação das fácies representativas, foram selecionados os pontos de amostragem com base na presença de fragmentos de cor escura, semelhantes a carvão, e de dimensões variadas (milimétricos a centimétricos), que posteriormente foram identificados como *charcoal*.

Ao todo, 10 amostras representativas dos fragmentos de *charcoal* foram coletadas, tombadas e identificadas como: Pb-5258, Pb-5259, Pb-5260, Pb-5261, Pb-5262, Pb-5270, Pb-5271, Pb-5272, Pb-5273 e Pb-5274. Posteriormente, os espécimes foram descritos macroscopicamente com o auxílio de lupa (aumento de

10 vezes), fotografados para registro, e armazenados na coleção de paleobotânica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### **3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-FEG)**

Experimentos controlados, desenvolvidos por diferentes autores (Bustin & Guo, 1999; Poole *et al.*, 2002; Hammes *et al.*, 2006; Scott & Glasspool, 2005, 2007; Braadbaart & Poole, 2008), elucidaram processos físicos e químicos ocorrentes durante a combustão. Dessa forma, a utilização de técnica de observação em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite observar modificações fundamentais que ocorrem na estrutura da parede celular, como por exemplo a homogeneização da lamela média em temperaturas a partir de 300 a 325°C. Portanto, para a observação e identificação da ocorrência, ou não, de incêndios e de homogeneização das lamelas médias, as amostras foram submetidas à análises através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) convencional e de Microscopia Eletrônica de Varredura de Alta Resolução (tipo *field emission gun* - MEV-FEG).

A preparação dos fragmentos seguiu o procedimento descrito por Mizusaki (1986) onde os fragmentos são colados (com fita dupla face) em porta amostras especiais (*stub*) (com raio de aproximadamente 5 mm) e posteriormente metalizados com ouro (espessura média de 100 Å) tornando assim a amostra condutora.

Para a análise através do MEV foi utilizado, as amostras foram preparadas e observadas com um microscópio Zeiss EVO 50, do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Já para a realização das análises no MEV-FEG, foi utilizado um microscópio Inspect F50 FEI, do Centro de Microscopia e Microanálises-IDEIA, da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

### **3.4. Petrografia Orgânica**

As análises de petrografia orgânica foram realizadas no Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A análise petrográfica para a identificação de inertinita foi realizada em três blocos de amostras de carvão vegetal macroscópico, polidos. Para obtenção dos blocos, as amostras inicialmente foram incorporadas em resina em orientação longitudinal e transversal, seguida de tratamento por vácuo para evitar a fragmentação (Jones & Rowe, 1999). Posteriormente, estes blocos foram polidos utilizando-se óxido de alumínio em pó, para obtenção de uma superfície altamente reflexiva (Collinson, 1999).

Após a preparação, as amostras foram observadas com um microscópio Leica DM 6000, com câmera digital acoplada a um monitor de resolução de 256 pixels e a um computador utilizando o *software* Diskus Fossil. O material foi submetido à preparação padrão para análise óptica como descrito por Bustin *et al.* (1989). Foi utilizada luz refletida, com lente objetiva de 20x, em óleo de imersão Immersol 518F e oculares de 20x padrão *Yttrium-Aluminum-Garnet*, em refletância nominal de 0,895 R random (%) (ISO 7404/5, 1984).

### **3.5. Fluorescência**

A identificação e caracterização de inertinita nos fragmentos de carvão vegetal, tanto macroscópico (descritos como fragmentos alongados e achatados), como microscópicos (dispersos no sedimento) foram realizadas através da técnica analítica Fluorescência de Raios-X. O equipamento utilizado foi um microscópio de luz transmitida Zeiss Axioplan equipado com filtro verde (AF488), do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As fotografias foram obtidas com uma câmera AxioCam MRc e as imagens foram analisadas e as medições efetuadas com o software Zeiss Axio Vision 4.8.1.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu Hamad, A.M.B., Jasper, A., & Uhl, D. (2012). The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: Signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic biases or lack of fuel?. *International Journal of Coal Geology*, 96, pp. 60-71.
- Ascough, P. L., Bird, M. I., Scott, A. C., Collinson, M. E., Cohen-Ofri, I., Snape, C. E., & Le Manquais, K. (2010). Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), pp. 1590-1599.
- Barberena M. C., & Bortoluzzi C. A. (1977). Bioestratigrafia preliminar da Formação Santa Maria. *Pesquisas*, 7:111 -129.
- Beaumont, O. La combustion du bois. Biomasse actualités, Numero Spécial No. 7, pp. 15-24.
- Belcher, C. M., & McElwain, J. C. (2008). Limits for combustion in low O<sub>2</sub> redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic. *Science*, 321(5893), pp. 1197-1200.
- Berner, R. A., & Canfield, D. E. (1989). A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 289(4), 333-361.
- Berner, R. A., & Canfield, D. E. (1989). A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 289(4), pp. 333-361.
- Berner, R. A. (2001). Modeling atmospheric O<sub>2</sub> over Phanerozoic time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(5), pp. 685-694.
- Berner, R. A. (2005). The carbon and sulfur cycles and atmospheric oxygen from middle Permian to middle Triassic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(13), pp. 3211-3217.
- Behling, H., Pillar, V. D., & Bauermann, S. G. (2005). Late Quaternary grassland (Campos), gallery forest, fire and climate dynamics, studied by pollen, charcoal and multivariate analysis of the São Francisco de Assis core in western Rio Grande do Sul (southern Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 133(3), pp. 235-248.
- Borsa, G. N. D. O. (2015). Novas chaves de correlação para as unidades triássicas do Gráben Arroio Moirão: caracterização de sismitos e aplicação na estratigrafia. Trabalho de Conclusão de Graduação, Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre. 141 p.

- Bortoluzzi, C.A., Guerra-Sommer, M., & Klepzig, M.C. (1985). Taoflora *Triássica* da Formação Santa Maria, RS, Brasil: I-Equisetales, Ginkgoales, Coniferales e Pteridophylla. *VIII Congresso Brasileiro de Paleontologia: 1983 MME-DNPM*, série Geologia, número 27. Paleontologia e Estratigrafia, número 2.
- Braadbaart, F., & Poole, I. (2008). Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of archaeological science*, 35(9), pp. 2434-2445.
- Bustin, R. M., Link, C., & Goodarzi, F. (1989). Optical properties and chemistry of graptolite periderm following laboratory simulated maturation. *Organic geochemistry*, 14(4), pp. 355-364.
- Bustin, R. M., & Guo, Y. (1999). Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology*, 38(3), pp. 237-260.
- Clark, J. S., & Patterson III, W. A. (1997). Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the paleorecord. In: *Sediment records of biomass burning and global change* (pp. 23-48). Springer Berlin Heidelberg. (Volume 51 of the series NATO ASI Series, pp. 23-48).
- Collinson, M. E. (1999). Scanning electron microscopy of megafossils and mesofossils. *Fossil plants and spores: modern techniques*, 57-64.
- Colombi, C. E., & Parrish, J. T. (2008). Late Triassic environmental evolution in southwestern Pangea: Plant taphonomy of the Ischigualasto Formation. *Palaios*, 23(12), pp. 778-795.
- Degani-Schmidt, I., Guerra-Sommer, M., de Oliveira Mendonça, J., Mendonça Filho, J. G., Jasper, A., Cazzulo-Klepzig, M., & Iannuzzi, R. (2015). Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). *International Journal of Coal Geology*, 146, pp. 55-67.
- Eckmeier, E., Gerlach, R., Skjemstad, J. O., Ehrmann, O., & Schmidt, M. W. I. (2007a). Minor changes in soil organic carbon and charcoal concentrations detected in a temperate deciduous forest a year after an experimental slash-and-burn. *Biogeosciences*, 4(3), pp. 377-383.
- Eckmeier, E., Gerlach, R., Skjemstad, J. O., Ehrmann, O., & Schmidt, M. W. I. (2007b). Only small changes in soil organic carbon and charcoal concentrations found one



- year after experimental slash-and-burn in a temperate deciduous forest. *Biogeosciences Discussions*, 4(1), pp. 595-614.
- Faccini, U.F. (1989). O Permo-Triássico do Rio Grande do Sul – uma análise sob o ponto de vista das sequências deposicionais. Tese (Dissertação de Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 133 p.
- Faccini, U.F. (2000). Estratigrafia do Permo-Triássico do Rio Grande do Sul: estilos deposicionais *versus* espaço de acomodação. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 300 p.
- Forbes, M. S., Raison, R. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of the total environment*, 370(1), pp. 190-206.
- Glasspool, I. (2000). A major fire event recorded in the mesofossils and petrology of the Late Permian, Lower Whybrow coal seam, Sydney Basin, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1), 357-380.
- Glasspool, I. J., Edwards, D., & Axe, L. (2004). Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, 32(5), pp. 381-383.
- Glasspool, I. J., Scott, A. C., Waltham, D., Pronina, N. V., & Shao, L. (2015). The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. *Frontiers in plant science*, 6, 756.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., & Iannuzzi, R. (1999). The Triassic taphoflora of the Paraná Basin, southern Brazil: a biostratigraphical approach. *Journal of African Earth Sciences*, 29(1), pp. 243-255.
- Guerra-Sommer, M., & Cazzulo-Klepzig, M. (2000). Early Permian palaeofloras from southern Brazilian Gondwana: a palaeoclimatic approach. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3), pp. 486-490.
- Gutsell, S. L., & Johnson, E. A. (2007). Wildfire and tree population processes. *Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response*, pp. 441-477.
- Hammes, K., Smernik, R. J., Skjemstad, J. O., Herzog, A., Vogt, U. F., & Schmidt, M. W. (2006). Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Organic Geochemistry*, 37(11), pp. 1629-1633.
- Horn, B. L. D., Melo, T. M., Schultz, C. L., Philipp, R. P., Kloss, H. P., & Goldberg, K. (2014). A new third-order sequence stratigraphic framework applied to the Triassic of

- the Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil, based on structural, stratigraphic and paleontological data. *Journal of South American Earth Sciences*, 55, pp. 123-132.
- Jasper, A., Guerra-Sommer, M., Hamad, A. M. A., Bamford, M., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C., Tewari, R., & Uhl, D. (2013). The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent - a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, 24(1), pp. 148-160.
- Jones, T. P. (1993). New morphological and chemical evidence for a wildfire origin for fusain from comparisons with modern charcoal. *Special Papers in Palaeontology*, 49(11), pp. 113-123.
- Jones, T.P., & Rowe, N.P. (1999). Embedding techniques: adhesive and resins. In: Jones, T.P., Rowe, N.P. (Eds.), *Fossil Plants and Spores: Modern Techniques*. *Geological Society of London*, pp. 71-75.
- Jost, H. (1981). *Geology and metallogeny of the Santana da Boa Vista region, Southern Brazil* (Doctoral dissertation, University of Georgia). 208p.
- Kemp, E. M. (1981). Pre-Quaternary fire in Australia. *Fire and the Australian biota*, pp. 3-21.
- Kuhlbusch, T. A., & Crutzen, P. J. (1996). Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide. *Biomass burning and global change*, 1, pp. 160-169.
- Lima, L., G. (2016). *Inunditos como um modelo sedimentar - identificação na área sudoeste do Gráben Arroio Moirão (RS)*. Dissertação de mestrado, UFRGS, PPGGEO.
- Lisle, R.J., Brabham, P., Barnes, J. (2014). *Mapeamento Geológico: Guia de campo*. Porto Alegre: Bookman, 231 p.
- Lupia, R. (1995). Paleobotanical data from fossil charcoal: an actualistic study of seed plant reproductive structures. *Palaios*, pp. 465-477.
- MacDonald, G. M., Larsen, C. P., Szeicz, J. M., & Moser, K. A. (1991). The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews*, 10(1), pp. 53-71.
- Manfroi, J., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Francischini, H., Martinelli, A. G., Soares, M. B., & Jasper, A. (2015). Extending the database of Permian palaeo-wildfire on Gondwana: Charcoal remains from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin), Middle Permian, Rio Grande do Sul State, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 436, pp. 77-84.

- McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C., Steart, D. C., Grassineau, N. V., & Gibbons, S. J. (2007). Ferns and fires: experimental charring of ferns compared to wood and implications for paleobiology, paleoecology, coal petrology, and isotope geochemistry. *Palaios*, 22(5), pp. 528-538.
- Menegat, R. & Scherer, C. M. S. (1993). Formação Caneleiras (RS): Devoniana ou Permo-Triássica?; Critérios para o enquadramento estratigráfico de sequências isoladas sobre o Escudo Sul-Rio-Grandense. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1. Rio Claro, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos*. Rio Claro, IG/UNESP, 1993. pp. 90-93.
- Milani, E. J. (1997). Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Milani, E. J., & Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), pp. 473-484.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., & França, A.B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), pp. 265-287.
- Mizusaki, A. M. P. (1986). A utilização do microscópio eletrônico de varredura no estudo de rochas reservatório de hidrocarbonetos. *SEMINÁRIO DE GEOLOGIA, Rio de Janeiro, Petrobrás/Depex*, 1, pp. 322-331.
- Higuera, P. E., Peters, M. E., Brubaker, L. B., & Gavin, D. G. (2007). Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews*, 26(13), pp. 1790-1809.
- Poole, I., Braadbaart, F., Boon, J. J., & van Bergen, P. F. (2002). Stable carbon isotope changes during artificial charring of propagules. *Organic Geochemistry*, 33(12), pp. 1675-1681.
- Power, M. J., Marlon, J. R., Bartlein, P. J., & Harrison, S. P. (2010). Fire history and the Global Charcoal Database: a new tool for hypothesis testing and data exploration. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1), pp. 52-59.
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). Introduction to wildland fire. John Wiley and Sons.
- Reis, G. S., Mizusaki, A. M. P., Roseinberg, A. Rubert, R. R. (2013). Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-

- básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*. v. 41, n. 2, pp. 155-168.
- Retallack, G. J. (1977). Reconstructing Triassic vegetation of eastern Australasia: a new approach for the biostratigraphy of Gondwanaland. *Alcheringa*, 1(3), pp. 247-278.
- Retallack, G. J., Veevers, J. J., & Morante, R. (1996). Global coal gap between Permian–Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *Geological Society of America Bulletin*, 108(2), pp. 195-207.
- Ribeiro, V. (2015). Evidência de incêndios em turfeira costeira do Rio Grande do Sul-Brasil e relação com flutuações climáticas no Quaternário. Dissertação de mestrado, UFRGS, POSGEA. 160p.
- Robinson, J. M. (1989). Phanerozoic O<sub>2</sub> variation, fire, and terrestrial ecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 75(3), pp. 223-240.
- Robinson, J. M. (1991). Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 12(1), pp. 3-24.
- Rößler, R., & Sterzeleanum, C. (2001). Der versteinerte Wald von Chemnitz:[Katalog zur Ausstellung Sterzeleanum]. Museum für Naturkunde.
- Schmidt, M. W., & Noack, A. G. (2000). Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global biogeochemical cycles*, 14(3), 777-793.
- Scott A. C. (1989). Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, 12 (1989), pp. 443–475.
- Scott, A. C. (2000). The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 164(1), pp. 281-329
- Scott, A. C., Cripps, J. A., Collinson, M. E., & Nichols, G. J. (2000). The taphonomy of charcoal following a recent heathland fire and some implications for the interpretation of fossil charcoal deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1), pp.1-31.
- Scott, A.C., & Glasspool, I. J. (2005). Charcoal reflectance as a proxy for the emplacement temperature of pyroclastic flow deposits. *Geology*, 33(7), 589-592.
- Scott, A. C., & Glasspool, I. J. (2006). The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(29), pp. 10861-10865.

- Scott, A.C., & Glasspool, I.J., (2007). Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. *International Journal of Coal Geology* 70, pp. 53–66.
- Scott, A.C. (2010). Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1), pp. 11-39.
- Scott, A.C., & Damblon, F. (2010). Charcoal: Taphonomy and significance in geology, botany and archaeology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1), pp. 1-10.
- Tanner, L. H., & Lucas, S. G. (2016). Stratigraphic distribution and significance of a 15 million-year record of fusain in the Upper Triassic Chinle Group, southwestern USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 461, pp. 261-271.
- Uhl, D., Jasper, A., Hamad, A. M. A., & Montenari, M. (2008). Permian and Triassic wildfires and atmospheric oxygen levels. *Ecosystems*, 9, pp. 179-187.
- Uhl, D., Jasper, A., Schindler, T., & Wuttke, M. (2010). First evidence of palaeo-wildfire in the early Middle Triassic (early Anisian) Voltzia Sandstone Fossil-Lagerstätte—the oldest post-Permian macroscopic evidence of wildfire discovered so far. *Palaios*, 25, pp. 837-842.
- Veevers, J. J., Conaghan, P. J., & Shaw, S. E. (1994). Turning point in Pangean environmental history at the Permian/Triassic (P/Tr) boundary. *Geological Society of America Special Papers*, 288, 187-196.
- Zerfass, H., Lavina, E. L., Schultz, C. L., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F., & Chemale, F. (2003). Sequence stratigraphy of continental Triassic strata of Southernmost Brazil: a contribution to Southwestern Gondwana palaeogeography and palaeoclimate. *Sedimentary Geology*, 161(1), pp. 85-105.
- Zerfass, H., Chemale, F., Schultz, C. L., & Lavina, E. (2004). Tectonics and sedimentation in southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*, 166(3), pp. 265-292.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos a partir do desenvolvimento deste projeto de mestrado, foram sintetizados e apresentados no artigo ***Extensive wildfires in a Triassic Dicroidium Flora of Brazilian Paraná Basin***, submetido ao periódico internacional *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. A carta de submissão, e o artigo submetido são apresentados a seguir.

### 5.1. Carta de Submissão

20/01/2017

Gmail - Submission PALAEO\_2017\_46 received by Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology



Daiane Cardoso &lt;daiane.cardoso.geo@gmail.com&gt;

Submission PALAEO\_2017\_46 received by Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology

1 mensagem

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology <Evisesupport@elsevier.com> 19 de janeiro de 2017 16:35  
 Responder a: palaeo-geo@elsevier.com  
 Para: daiane.cardoso.geo@gmail.com

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: PALAEO\_2017\_46

Title: Extensive wildfires in a Triassic Dicroidium Flora of Brazilian Paraná Basin

Journal: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology

Dear Miss. Cardoso,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE\* at: [http://www.evises.com/evises/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL\\_ACR=PALAEO](http://www.evises.com/evises/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=PALAEO) and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE\* via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright © 2017 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

**5.2. Artigo Submetido ao periódico internacional  
*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.***

**Extensive wildfires in a Triassic *Dicroidium* Flora of Brazilian Paraná Basin**

Daiane dos Santos Cardoso<sup>a\*</sup>, Ana Maria Pimentel Mizusaki<sup>a</sup>, Margot Guerra-Sommer<sup>a</sup>, Rualdo Menegat<sup>b</sup>, André Jasper<sup>c</sup>, Dieter Uhl<sup>d,e</sup>.

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGeo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 91.509-900 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

<sup>b</sup>Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91.509-900 Porto Alegre, Brazil

<sup>c</sup>Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento (PPGAD), Centro Universitário UNIVATES, 95.900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil

<sup>d</sup>Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, 60325 Frankfurt am Main, Germany

<sup>e</sup>Senckenberg Center for Human Evolution and Palaeoenvironment, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, 72076 Tübingen, Germany

\* Corresponding author: Daiane dos Santos Cardoso

Present address: Av. Bento Gonçalves, 9500, Instituto de Geociências, prédio 43137, sala 204, 91.509-900 Porto Alegre, Brazil.

**ABSTRACT**

For the first time wildfires are reported from an association of different facies containing a *Dicroidium* flora from the Middle Triassic (Ladinian) red beds in the southern part of the Paraná Basin (Santa Maria Formation, Rio Grande do Sul state). The geographical extension of the *Dicroidium* plant assemblage has thus been extended in the Brazilian Gondwana. Analyses through petrography, fluorescence microscopy, scanning (SEM) and field emission gun scanning electron microscopy (FEG-SEM) revealed recurrent charcoal presence in a vertical facies succession of depositional cycles related to ephemeral prograding low density flows. Microscopic charcoal occurs as common fragments within different facies whereas macroscopic charcoal is represented by tridimensional wood specimens assigned to

gymnosperms (Pinaceae?) and by flattened, thin, elongated remains assigned to pteridospermophytes (rachises of *Dicroidium?*). Average reflectance values between 2.80-6.61 %Ro measured in the macro-charcoals evidenced burning processes of high temperature, involving fires both in the crown and in the crown-surface interface. The recurrence of charcoal in several facies of the studied profile indicates regional wildfires, which affected hinterland, meso-xerophyllous coniferous assemblages and marginal hygro-mesophyllous *Dicroidium*-like assemblages. The integration of results obtained from the multiple charcoal analyses is consistent with an atmospheric oxygen content higher than 20 %.

**Key-words:** organic petrography, scanning electron microscopy, micro-charcoal, macro-charcoal, paleowildfires, red beds.

## 1 INTRODUCTION

The presence of charcoal in geological strata indicates the occurrence of wildfires since the Silurian (Glasspool et al., 2004) up to the Quaternary in various environments (Flannigan et al., 2009; MacDonald et al., 1991; Scott, 1989, 2000, 2010; Scott and Glasspool, 2006).

In the Brazilian Gondwana macroscopic charcoal has been recovered from the basal transgressive interval of the intracratonic Paraná Basin in the coal-bearing strata at the waning of the Permian icehouse stage (Rio Bonito Formation, Sakmarian-Artinskian) along the northern and southern borders of the basin (Degani-Schmidt et al., 2015; Jasper et al., 2013 and citations therein). Those findings ratified biogeochemical models (Berner, 2006; Berner et al., 2003; Glasspool and Scott, 2010) that predicted the occurrence of atmospheric oxygen levels peaks (up to 28 %) during the early Permian (Scott and Glasspool, 2006). Manfroi et al. (2015) also identified charcoal fragments in the Paraná Basin from a bonebed included in the last progradational cycle related to the complete continentalization of the large confined sea that occupied the area in the middle Permian Rio do Rasto Formation.

Fire evidence from the late Triassic (Belcher and McElwain, 2008; Tanner *et al.*, 2006) disproved the early Mesozoic p(O<sub>2</sub>) minimum of 10 % predicted by the geochemical models (Berner, 2006; Falkowski et al., 2005). The presence of charcoal remains in the late Triassic of western Germany (Uhl and Montenari, 2011)



suggests that wildfires occurred more or less frequently, although the atmospheric oxygen concentration may have been relatively low during the Triassic (Berner, 2002, 2006, 2009). Colombi and Parrish (2008) also reported the presence of charcoal during a seasonally dry interval in a general context of monsoonal climate in the Ischigualasto Formation (middle Carnian) of Argentina.

Triassic rocks containing fossil plants are very scarce in the Brazilian Paraná Basin, and paleobotanical data are mainly restricted to silicified woods (Guerra-Sommer et al., 1999). The recognition of a *Dicroidium* flora concentrated in a confined area in the central region of the Rio Grande do Sul state (Santa Maria region) led to the identification of an informal floristic interval named “*Dicroidium odontopteroides* flora” of late Anisian to late Ladinian age (Guerra-Sommer et al., 1999). Outcrops in almost all Triassic sequences from the southern Paraná Basin have been thoroughly investigated for wildfire evidence, but obvious microscopic and macroscopic charcoals were absent. This has partly been attributed to the nature of sedimentation that would have occurred under semi-arid conditions according to studies of Holz and Scherer (2000).

In the present study, the finding of abundant plant impressions of the *Dicroidium* flora in an outcrop of the Santa Maria Formation in the southern part of the Rio Grande do Sul state (area of Arroio Moirão Graben in Pinheiro Machado municipality) extended the geographic occurrence of this pteridospermous association. The presence of charcoal within these strata indicates the occurrence of wildfires during the middle Triassic in the southern part of the Paraná Basin. The present study aims to establish a paleoenvironmental interpretation in a regional context and an extended geographical extension of the *Dicroidium* flora in the Brazilian Gondwana.

## **2 GEOLOGICAL SETTING AND SOURCE STRATA**

The Paraná Basin is a large intracratonic basin located in South America, covering southern Brazil, eastern Paraguay, northeastern Argentina and northern Uruguay regions, totaling an area of approximately 1.7 million km<sup>2</sup> (Milani et al., 2007) (Fig. 1). Its stratigraphic record comprises a sedimentary-magmatic package with a maximum total thickness of around 7.000 meters that developed during the Paleozoic and Mesozoic, with the deposition spanning from the Upper Ordovician to the Upper Cretaceous (Milani et al., 2007). Using criteria of sequence stratigraphy,

Milani et al. (2007) identified six supersequences, which were named from base to top as Rio Ivaí (Ordovician/Silurian), Paraná (Devonian), Gondwana I (Carboniferous/Lower Triassic), Gondwana II (Middle/Upper Triassic), Gondwana III (Jurassic/Lower Cretaceous) and Bauru (Upper Cretaceous). The Gondwana II Supersequence, subject of the present study, is represented by the Triassic sedimentary unit named Santa Maria Formation.

Zerfass et al. (2003, 2004), based on regional data, characterized two second-order depositional sequences in the continental Triassic succession of southernmost Brazil, Sanga do Cabral (Lower Triassic) and Santa Maria (Middle to Upper Triassic) Supersequences. The Santa Maria Supersequence is composed of three third-order sequences (Zerfass et al., 2003). At the base, the Santa Maria Sequence I (SMSI) comprises clast-supported conglomerates and cross-bedded sandstones, overlain by laminated mudstones. This facies association was interpreted as fluvial passing to shallow lacustrine deposits (Zerfass et al., 2003). Santa Maria II Sequence (SMSII) is composed of medium to fine-grained, cross-bedded sandstones and mudstones lenses at the base, grading to thick mudstones in the middle part. They were interpreted as high-sinuosity fluvial and over-bank deposits (Zerfass et al., 2003). The top portion of SMSII displays a coarsening-upward succession composed of rhythmites (siltstone-mudstone) intercalated with lenses of fine-grained, cross-bedded or climbing cross-laminated sandstones, deposited in a lacustrine-deltaic system (Zerfass et al., 2003). Santa Maria III (SMSIII) consists of cross-stratified, conglomeratic sandstones with abundant silicified logs. Lithostratigraphically, the SMSI and SMSII correspond to the Santa Maria and Caturrita Formations, and SMSIII corresponds to the Mata Formation (Zerfass et al., 2003).

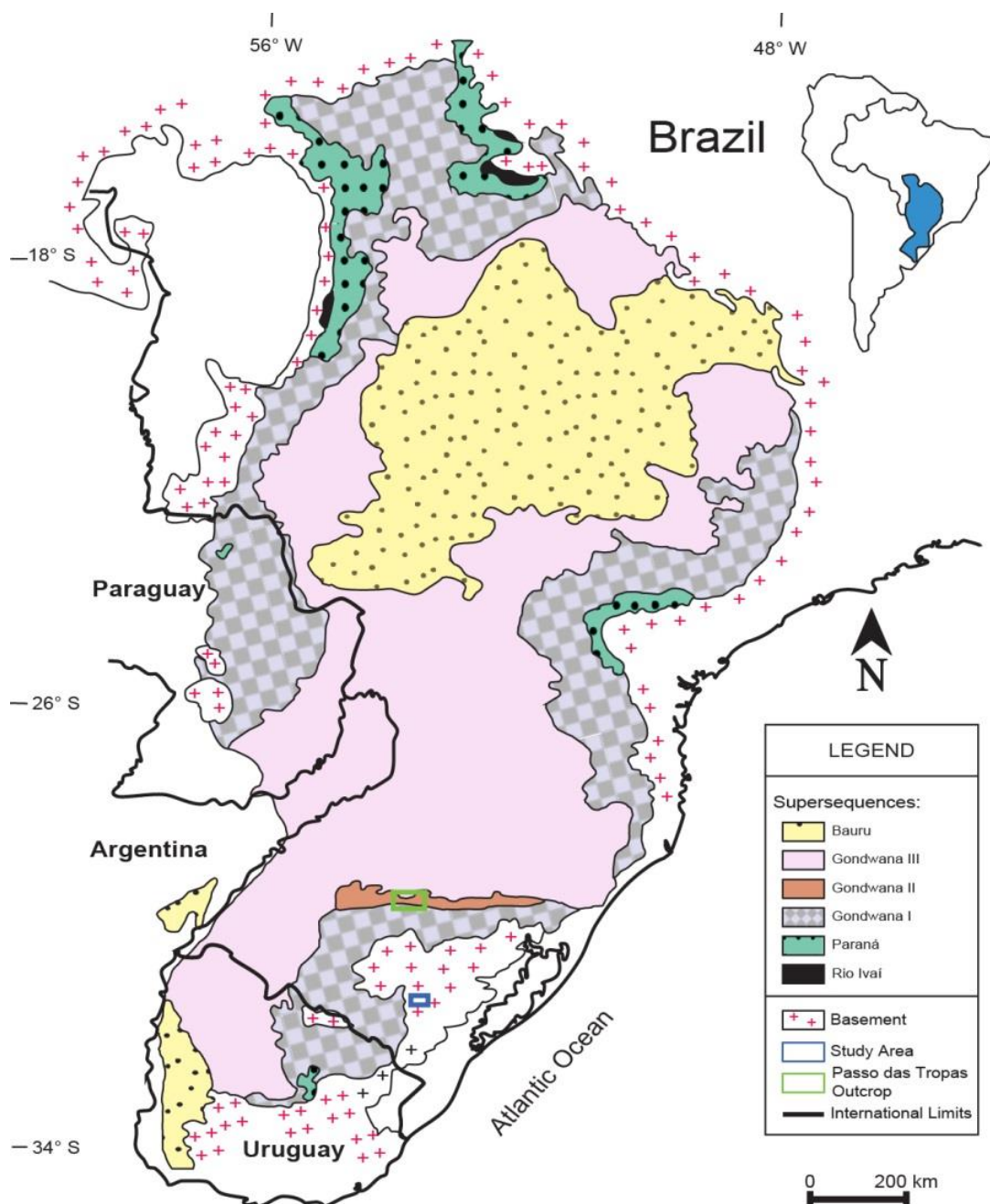


FIGURE 1. Stratigraphic framework of the Brazilian Paraná Basin (modified from Milani and Ramos, 1998). The original geographic occurrence of the *Dicroidium* flora, Passo das Tropas Outcrop (Da Rosa et al., 2013) is highlighted in green. The study area overlying the basement is highlighted in blue.

The studied profile (Fig. 2) is included in the SMSI of the second-order depositional sequence, and occurs as an isolated sedimentary unit overlying the basement (Ketzer and Ferreira, 1997; Machado et al., 2015) (Fig. 2). In this profile 16 different facies were identified which commonly present tabular geometry, reddish

color, poor selection, quartz-feldspar composition and cementation by iron oxide. Through systematic and regional mapping, a depositional model of ephemeral prograding low density flows was identified (personal communication L.G. Lima), which had previously been classified as braided fluvial by Ketzer and Ferreira (1997). Similarly McKee et al. (1967) assigned the facies assemblage of Bijou Creek deposits (Colorado, United States of America) to braided-stream deposits, which could be related to ephemeral stream subject to catastrophic floods in arid environments (Miall, 1977). In the present study, the facies were grouped in three associations, which represent depositional cycles of ephemeral prograding low density flows (Zavala et al., 2011). The paleobotanical and charcoal analyses have been carried out in the basal siltstone-sandstone facies (Fig. 2).

Through systematic and regional mapping and key-surfaces correlation, two repeated system tracts along the profile and five high frequency sequences were identified (personal communication of G.N.O. Borsa). The studied interval is included in the first basal sequence (S1, Fig. 2).

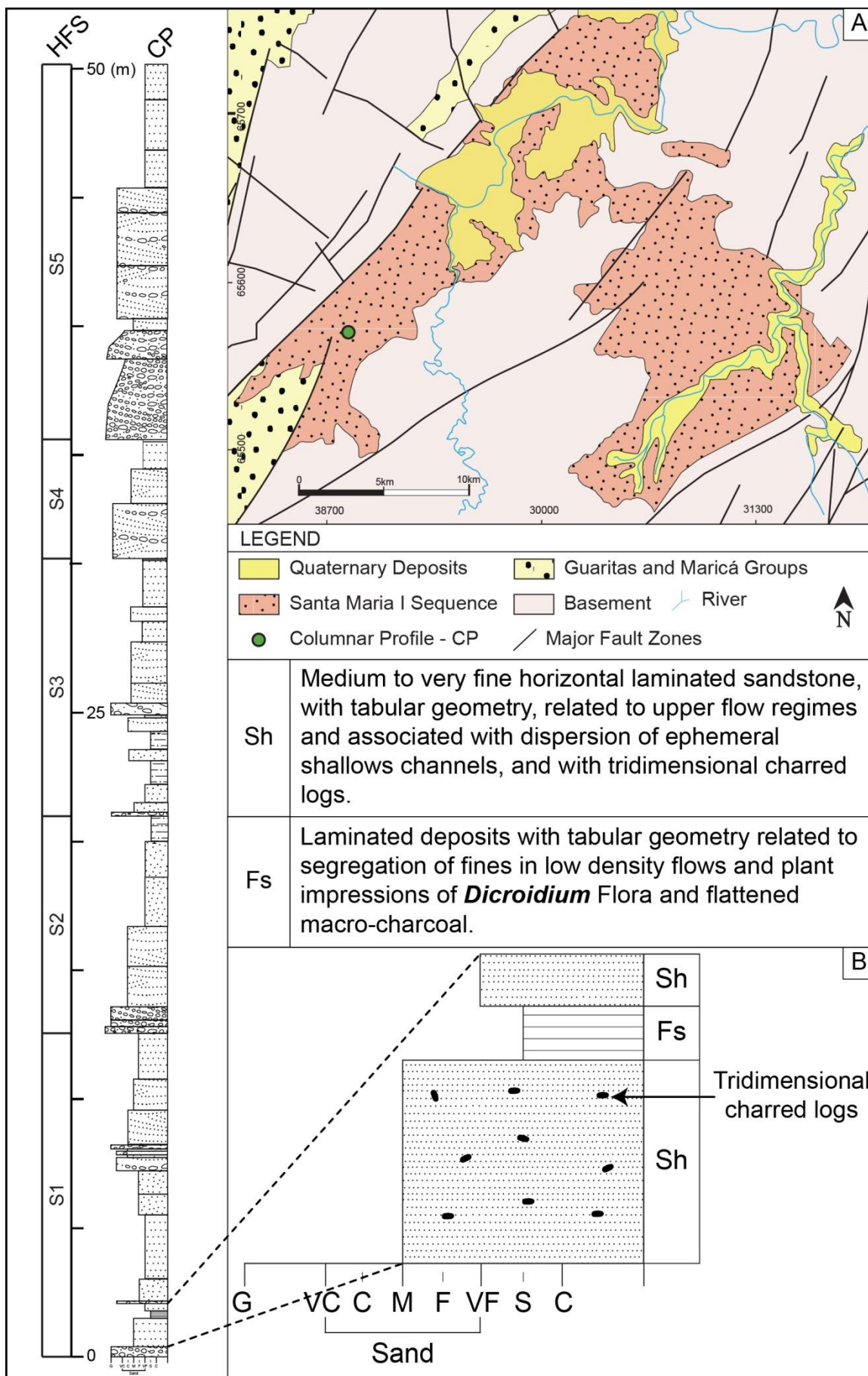


FIGURE 2. Studied profile. (A) Outcrop detailed location (after Borsa personal communication) showing the geological units occurring in the study area. (B) Detail of Sequence 1 with the occurrence of tridimensional logs (macro-charcoal) within the basal sandstone facies (Sh), the plant impressions of *Dicroidium* flora and flattened (macro-charcoal) within the Sh facies (siltstone). Micro-charcoal was dispersed in all three facies (Sh-Fs-Sh).

The floral assemblage from Santa Maria region (Passo das Tropas outcrop, central part of Rio Grande do Sul state, Fig. 1) referenced to the SMSI by Zerfass et al. (2003) corresponds to the *Dicroidium odontopteroides* flora (Guerra-Sommer et al., 1999) of Ladinian age. This relative age agrees with the radiometric minimum absolute age  $236 \pm 1.5$  Ma for the maximum deposition of SMSI (Philipp et al., 2013) corresponding to the top of the Ladinian (Cohen et al., 2013 updated 2016).

### 3 MATERIAL AND METHODS

Plant remains preserved as leaf impressions (Fig. 3) and flattened elongate macro-charcoal fragments (Fig. 4) were collected in the field from a siltstone level (Fig. 2). The tridimensional wood fragments (Fig. 4) were recovered from the sandstone facies (Fig. 2). The material is stored under the code numbers Pb-5263 to Pb-5269 at the paleobotanical collection of the Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGeo/UFRGS).

The material was firstly observed under stereomicroscope (LEICA S8APO) and digital photographs were taken with the aid of a connected digital camera (LEICA EC3).

The hand samples containing the tridimensional logs were cut with a diamond saw. Two additional thin, flattened, elongated specimens were extracted from the sediment with needles.

For the Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis, samples were mounted on standard stubs with adhesive tabs, metalized with gold and observed with a Zeiss EVO 50 at Centro de Microscopia Eletrônica/UFRGS and for the Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy (FEG-SEM) analysis, samples were mounted on standard stubs with adhesive tabs, metalized with gold and observed with a Inspect

F50 FEI at Centro de Microscopia e microanálises-IDEIA at Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

Petrographic analysis was undertaken in three polished blocks of charred samples. To obtain the blocks, the samples were embedded in epoxy resin in longitudinal and transversal orientation, followed by vacuum treatment to prevent fragmentation (Jones and Rowe, 1999). They were then polished using aluminum oxide powder to obtain a highly reflective surface (Collinson, 1999).

The tridimensional logs were observed at the Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo/UFRGS, with a Leica DM 6000 reflected light microscope through a 20x objective under oil (Immersion 518F). For the microscope calibration it was employed a standard Yttrium-Aluminum-Garnet, in nominal reflectance of 0,895 R random (%) (ISO 7404/5, 1984). The material was submitted to the standard preparation for optical analysis as described by Bustin et al. (1989).

The inertinite reflectance measurements were conducted in three specimens (tridimensionals Pb-5258 and Pb-5259; flattened Pb-5260) using the Diskus Fossil system. A total of 36 to 50 measurements were taken per sample to obtain the reflectance data as a proxy for estimating burning temperature. Different burning temperatures were calculated from selected reflectance populations from the total reflectance histograms. The interval definition was according to the inertinite reflectance-temperature-fire type relationships as defined by Jones et al. (1991), Scott (2000) and Scott and Jones (1994).

The correlation between inertinite reflectance and burning temperature is not completely linear, and has been described by the linear regression equation (1):

$$T = 184.10 + 117.76 \times \%Ro \quad (r^2 = 0.91) \quad (1)$$

where T is the burning temperature and %Ro is the measured inertinite reflectance (Jones, 1997).

Micro-charcoal and fragments of flattened macro-charcoals were identified by observation of petrographic slides of the rock matrix under transmitted light (Zeiss Axioplan 2). The same equipment was used for fluorescence observation with green (AF488) filter. Pictures were taken using an AxioCam MRc camera and the images were analyzed and measurements taken with Zeiss Axio Vision 4.8.1 software.

Additionally, a cross-section of the Pb-5258 sample was analyzed using microscope Axioskop 2 Plus Zeiss equipped with spectrometer J&M (MSP 200)

through a x50 objective. The microscope, located at Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), was calibrated with a Sapphire standard (0.595 %Ro).

## 4 RESULTS

### 4.1 GENERAL ASPECTS OF THE MEGAFLORA

The megafloora is characterized by the presence of impressions of plant remains in high density, in no preferential orientation, showing different sizes and lacking evidence of charring. The fossil plant impressions are mostly *Dicroidium* fronds (sensu Petriella, 1979; Retallack, 1977).

The apical end of the fronds, with the typical bifurcation of the *Dicroidium* genus, is rarely preserved. The plant assemblage is mainly composed of incomplete fragments of bipinnate fronds ranging from 3.5-6.5 cm to 5-7.5 cm long (Fig. 3A, E), followed in abundance by fragments of simply pinnate forms (Fig. 3C), presenting longitudinally striated rachis, varying from 0.5 mm to 1.5 mm in width. The pinnulae are rhombic to elongate, have entire margins and are often decurrent, the arched veins are typically odontopteroid radiating directly from the rachis (Fig. 3C). A single fragmentary specimen of *Neocalamites* sp. measuring 7 mm x 10 mm was also identified (Fig. 3D).

Evidence of herbivory, which is distinct from mechanical damage produced by water transport, is commonly observed in curved cropping patterns at the margins of some *Dicroidium* pinnae (Fig. 3B).



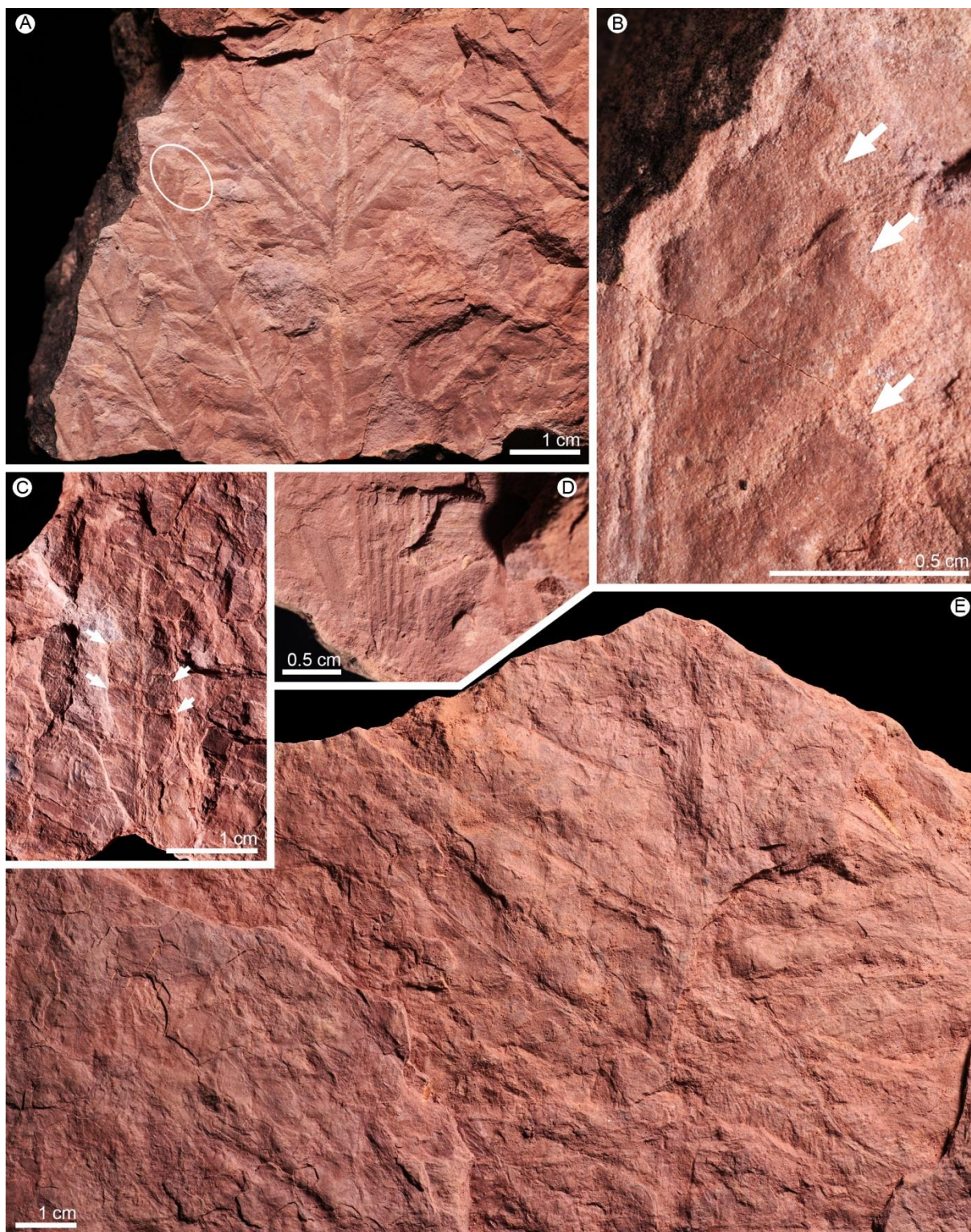


FIGURE 3. Leaf impressions. (A, E) *Dicroidium* sp. bipinnate frond showing elongated, decurrent pinnules with entire margin. (B) Detail of (A), evidencing curved cropping patterns at the pinnule margins (arrows). (C) *Dicroidium* sp. pinnules, rhombic to elongate, decurrent, with entire margins and arched venation radiating directly from the rachis (odontopteroid venation). (D) Fragment of *Neocalamites* sp. internode with longitudinal furrows bound by nodes.

## 4.2 CHARCOAL ANALYSES

The tridimensional logs occur randomly dispersed and are included in the sandstone level (Fig. 4A-D). The outer surfaces show abrasion (Fig. 4A, B) in both width and length. The irregular blackened surface areas of the samples (Fig. 4A) do not show the usual black luster commonly seen in charcoal (fusain), and cannot be crushed by finger pressure (contrary to a common feature of macro-charcoal fragments according to Scott, 2000, 2010).

In the cross-section of a specimen a dark-colored area can be observed mainly at the periphery of the logs (Fig. 4C). There is a growth ring 4 mm wide and a brown area mainly restricted to the center of the log (Fig. 4C). Longitudinal sections evidenced that the fragments correspond to abraded (thus anatomically incomplete) logs (Fig. 4D).

Dark elongate fragments showing superficial, irregular striations (Fig. 4E, F) are randomly dispersed in the association of *Dicroidium* fronds. These samples show black luster and can be crushed by finger pressure.

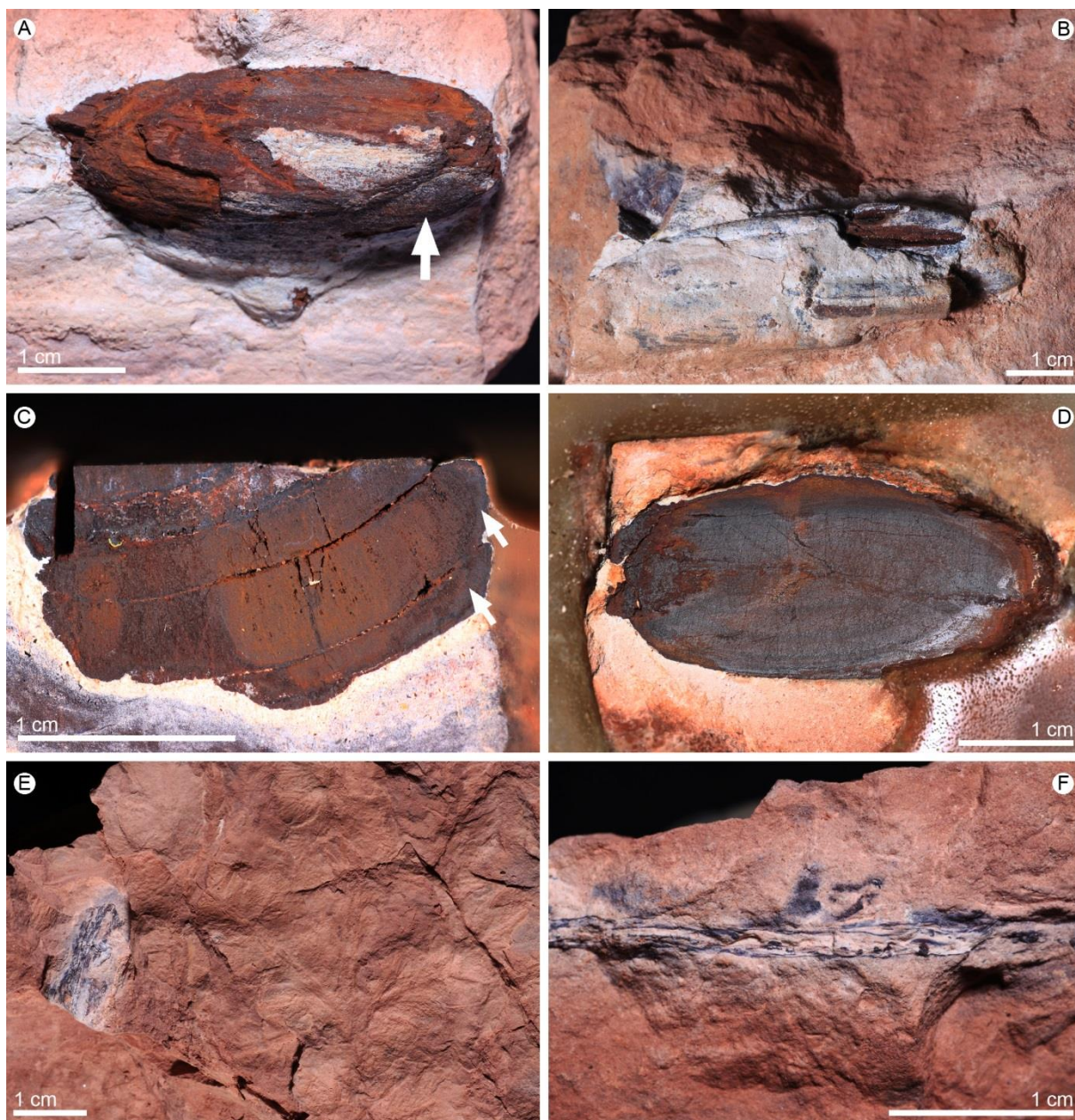


FIGURE 4. Macro-charcoal. (A, B) External view of the tridimensional logs (Pb-5258 and Pb-5259) included in the sediment showing abrasion in both width and length and irregular blackened areas (arrow). (C) Cross-section of wood fragment (Pb-5258) showing growth rings; dark, charred areas mainly in the periphery of the wood (arrows). (D) Polished longitudinal section of the superficially charred areas (Pb-5259). (E) Flattened macro-charcoal fragment dispersed within the *Dicroidium* frond assemblage showing superficial, irregular striation. (F) Longitudinal section of an elongate charred fragment (Pb-5260) showing black surface.

SEM and FEG observation of inner regions of the tridimensional logs evidenced some shattered, mostly rounded (Fig. 5A, B) and also square tracheid casts (Fig. 5C).

The cell walls are sometimes absent, represented by longitudinal lacunae (Fig. 5B, C) or by spaces infilled with clay minerals (Fig. 5E). In some regions it is clearly evidenced the presence of layered cell walls (Fig. 5D), as well as open lumens (Fig. 5D).

Anatomical characters include isolated casts of uniseriate circular bordered pits (10  $\mu\text{m}$  mean diameter) on the mineralized radial lumen (Fig. 5C, E) evidencing tori (Fig. 5C, E).

In the darker, more peripheral portion of the logs, the tracheid cell walls are homogenized and highly fragmented (Fig. 5F-H). In this area the infilling of the open lumens with clay minerals can be better observed (Fig. 5F-H).

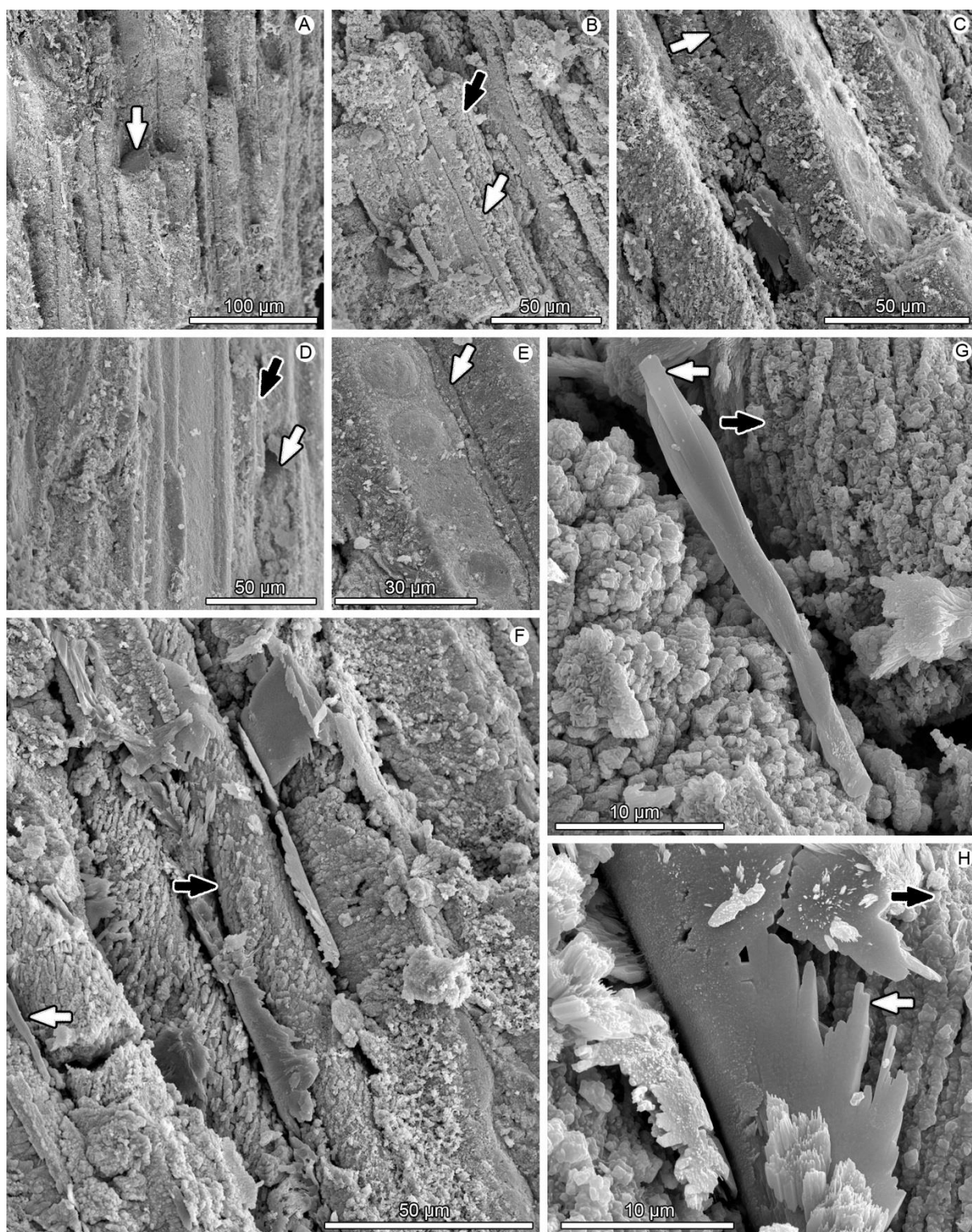


FIGURE 5. Longitudinal sections of the tridimensional logs under SEM-FEG. (A) Uncharred tissue; rounded tracheid lumen filled with clay minerals (arrow). (B) Cell wall showing fragments of isolated pitting (white arrow); cell lumen filled with clay minerals (black arrow). (C) Square tracheid lumen; cell walls absent represented by lacunae (arrow). (C, E) Isolated uniseriate, circular bordered pits featuring tori preserved as casts on the mineralized radial wall surface. (D) Open tracheid lumen

(white arrow) and adjacent secondary cell wall layers of neighboring cells (black arrow). (E) Cell wall replaced by clay minerals (arrow). (F, G, H) Charred tissue showing homogenization of tracheid cell wall (white arrows); cell lumen filled with clay minerals (black arrows). (G) Detail of F (white arrow).

Organic petrography analysis under reflected light revealed that this outer xylem region of the tridimensional logs, as well as some partially preserved outer bark tissue (Fig. 6A, B), correspond to inertinite. In the bark region there are sharp transitions between areas clearly showing both charred and uncharred cell walls (Fig. 6B) and the presence of a longitudinal duct with uncharred walls surrounded by charred parenchyma tissue (Fig. 6C).

Under SEM the dark elongate fragments exhibit partially homogenized cell walls (Fig. 6D). Organic petrography analysis also indicated that these fragments correspond to inertinite (Fig. 6E).

Micro-charcoal fragments occur dispersed through the sandstone, are not concentrated on bedding-planes and mostly show similar size and shape (5  $\mu\text{m}$  mean diameter) with no evident cellular organization (Fig. 6F). Rare fragments of micro-charcoal feature acute, non-abraded edges (Fig. 6G, H), irregular shape and sizes (10-100  $\mu\text{m}$ ) and cell wall homogenization.

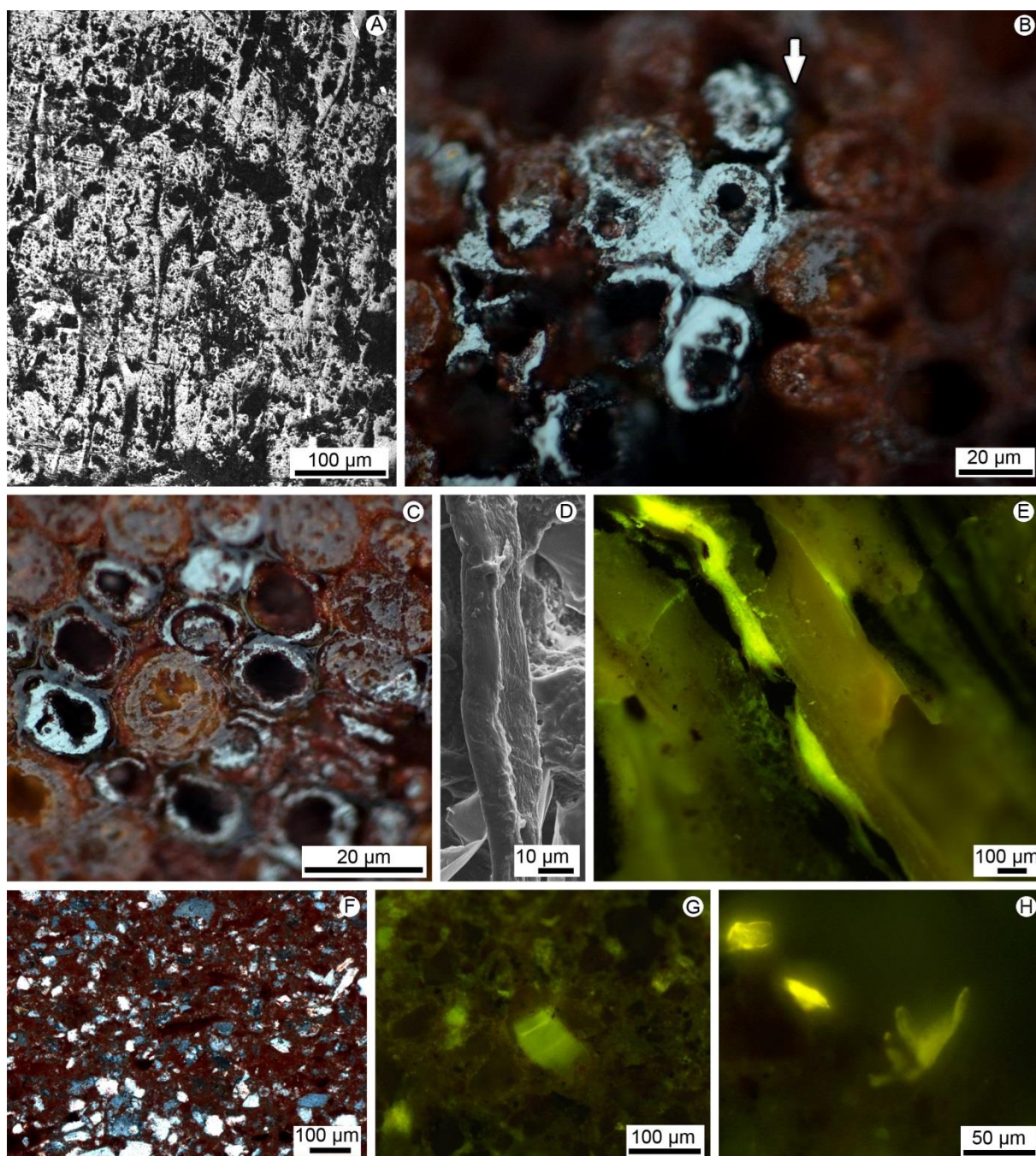


FIGURE 6. Organic petrography analysis. (A) Tangential view of tridimensional log; cell walls preserved as inertinite under reflected light. (B) Cross-section of tridimensional log showing sharp transition between charred (inertinite) and uncharred cell wall (arrow). (C) Tridimensional log in cross-section featuring an uncharred duct surrounded by charred tissue (inertinite). (D, E) Longitudinal views of a thin, flattened macro-charcoal fragment observed under SEM showing homogenized cell wall and observed under fluorescence microscopy as inertinite. (F) Petrography of dispersed micro-charcoal fragments (inertinite) in the sandstone rock matrix. (G, H) Fluorescence of micro-charcoal (inertinite) with irregular shape and size, dispersed in the sandstone rock matrix.

The reflectance distribution of the macroscopic charred fragments reveal several reflectance populations (Figs. 7, 8 and 9).

Measured maximum reflectance values exceed 8 %Ro. They are characterized by three pronounced levels of high-reflecting inertinite with average reflectance. These levels range from 2.83 to 5.51 %Ro in the sample Pb-5258 (Fig. 7) and from 3.01 to 4.79 %Ro in the sample Pb-5259 (Fig. 8), both corresponding to tridimensional logs included in sandstones beds. Average values between 2.80 and 6.61 %Ro were obtained from the thin, flattened fragment (Pb-5260, Fig. 9), preserved in the siltstones containing the impressions of *Dicroidium flora*.

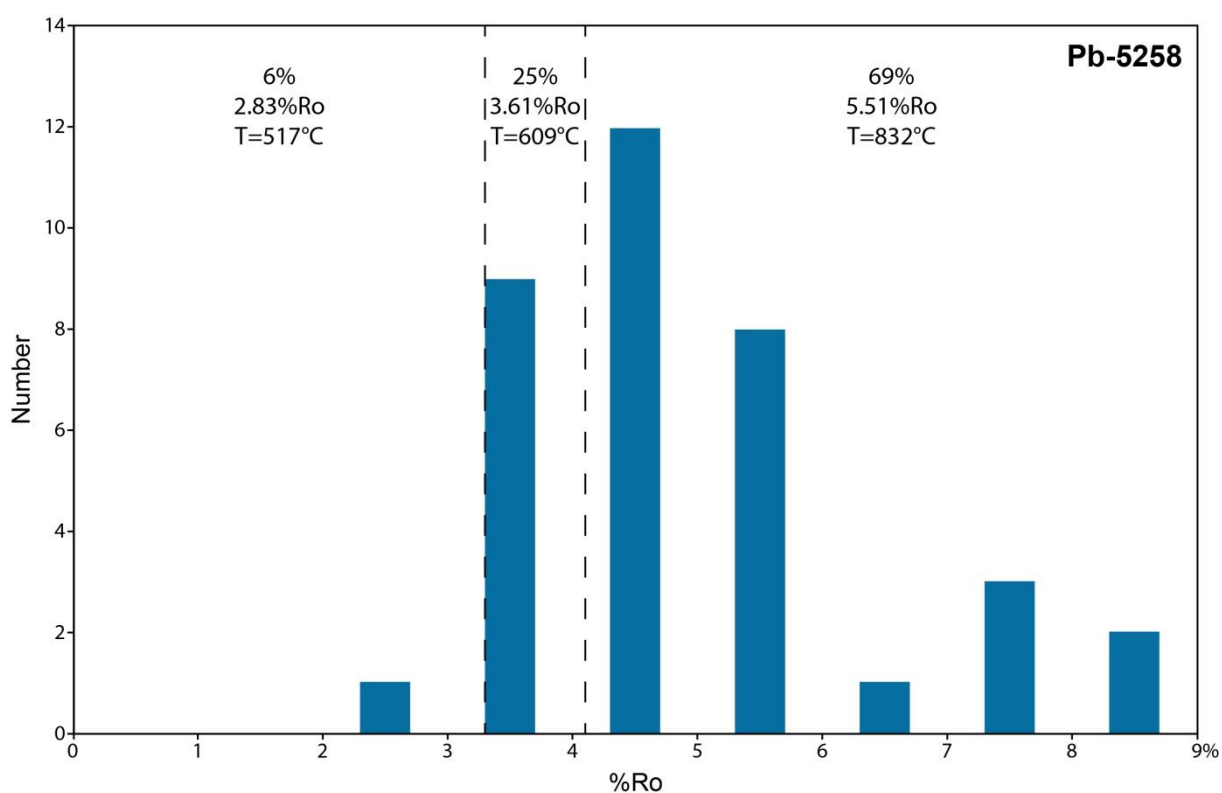


FIGURE 7. Inertinite reflectance histogram of Pb-5258 sample showing calculated burning temperature of selected intervals (after Petersen and Lindström, 2012).



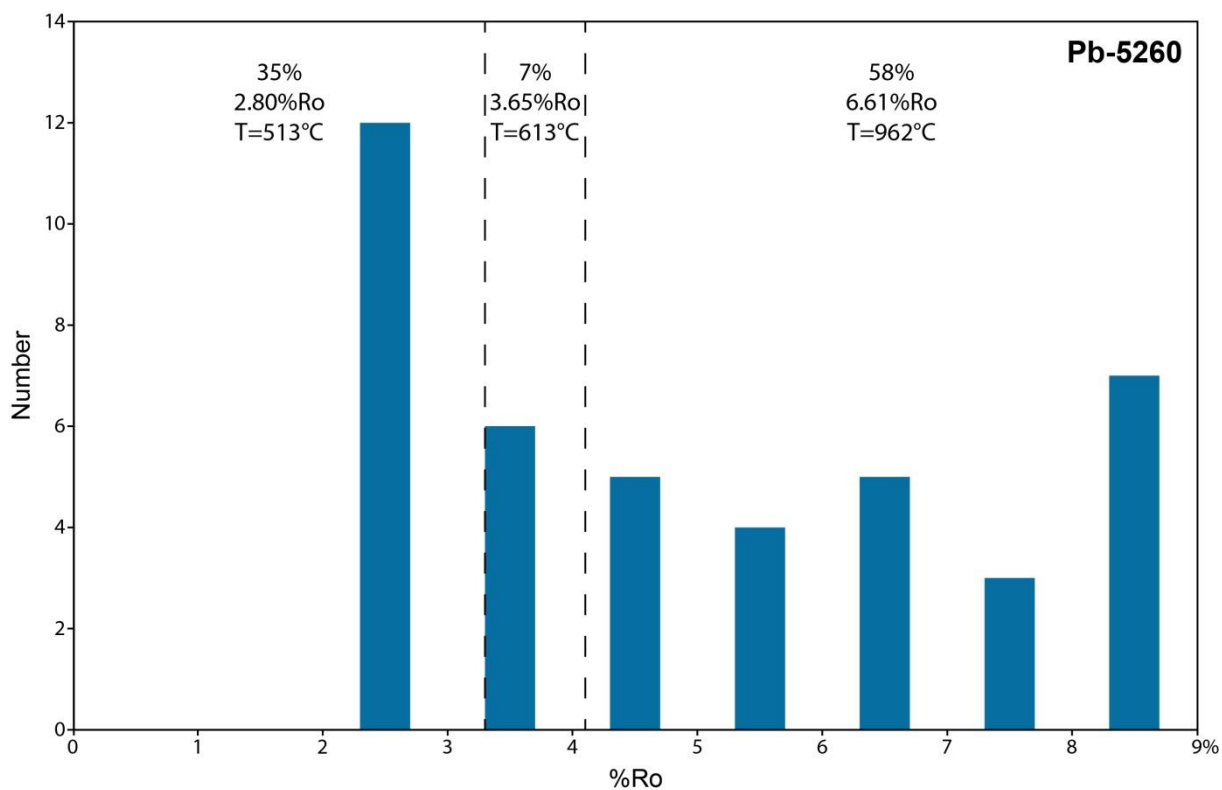


FIGURE 8. Inertinite reflectance histogram of Pb-5259 sample showing calculated burning temperature of selected intervals (after Petersen and Lindström, 2012).

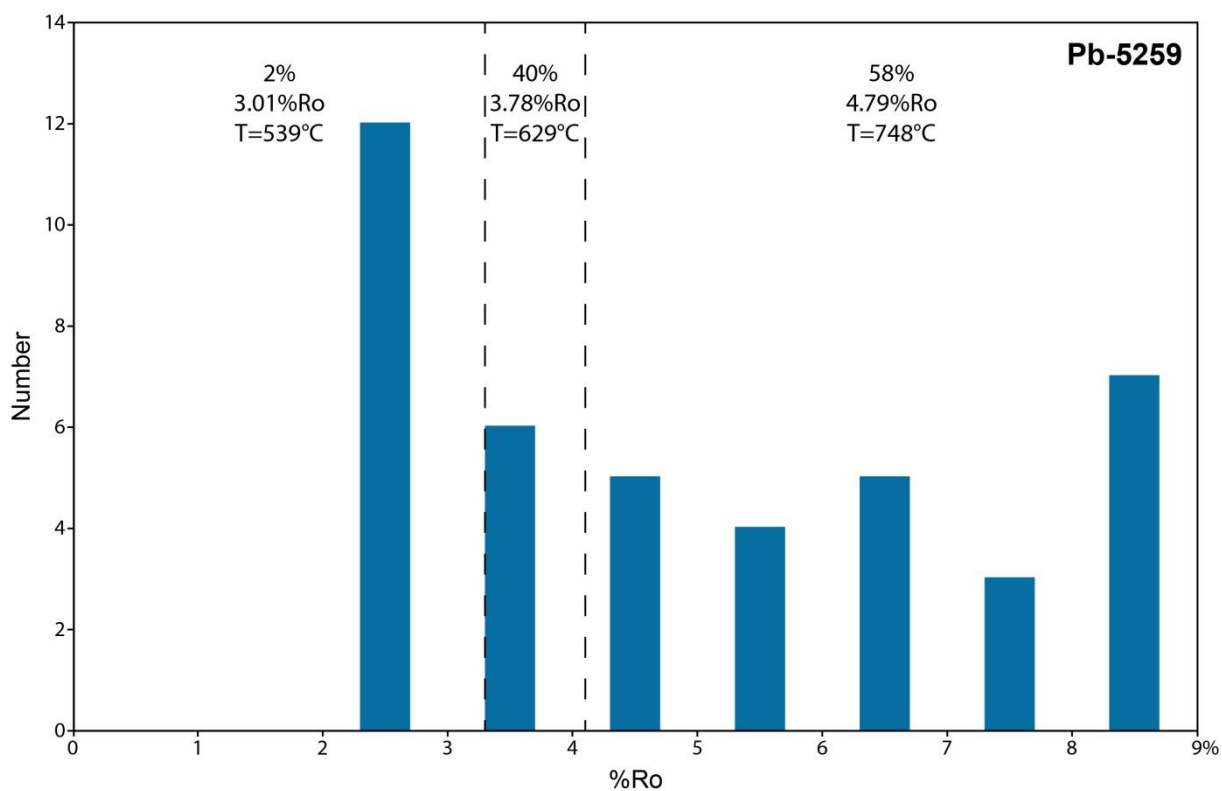


FIGURE 9. Inertinite reflectance histogram of Pb-5260 sample showing calculated burning temperature of selected intervals (after Petersen and Lindström, 2012).

## 5 DISCUSSION

The studied plant fragments dominated by *Dicrodium* fronds in heterogeneous sizes are preserved as densely packed impressions of vegetative organs in no preferred orientation in the siltstones facies (Fig. 2). Such compositional and taphonomic characteristics could indicate limited transport before deposition and burial.

The *Dicrodium* morphogenus is included in the Pteridospermophyta (sensu Taylor et al., 2009) and appeared in the late Permian of northern Gondwana (Abu Hamad et al., 2008; Kerp et al., 2006), diversified exclusively during the middle Triassic of Gondwana and declined in the late Triassic (Bomfleur et al., 2007; Zamuner et al., 2001). The presence of *Neocalamites* sp. has been previously recorded for the *Dicrodium* flora of southern Brazil (Guerra-Sommer et al., 1999). Their joint occurrence has been related with lagoon-margin swamp vegetation (Retallack, 1977).

Based on the anatomical features, the charred tridimensional wood specimens (Pb-5258 and Pb-5259) can be assigned to gymnosperms. Some similarities with the conifer group, probably pinacean conifers known from the Triassic, are indicated by the abietoid type of pitting (Fig. 5C, E) and by the identification of longitudinal ducts within the bark (Fig. 6C). The presence of conifers (*Podozamites*) as elements of the *Dicrodium* flora from southern Brazil was previously documented by Bortoluzzi et al. (1985).

The shattered, homogenized xylem cell walls (Fig. 5F-H) preserved in the peripheral portion of the stem could have been produced by attrition or compression after burning. In this case, total crushing was prevented by the presence of mineralized lumens (Fig. 5F) which conferred protection against further degradation. The mineralization process of the material here studied is very similar to that documented by Uhl and Montenari (2011) in charred woods from the Triassic of SW Germany. Indeed, their “mineralized” nature (sensu Jones et al., 2002) was probably a decisive factor in keeping the logs together after transport.

The reflectance data (Fig. 10) indicate that the burning process occurred predominantly under high temperatures (from 748 to 962 °C), accounting for 58 % to 69 % of the measurements. Such high temperature values indicate the dominance of crown fires (Clark et al., 1998; Scott, 2010). Additionally, based on the size of the

studied material, the charcoal fragments could correspond to twigs of pinacean plants (Willis and McElwain, 2002). It is therefore inferred here that the material could correspond to partially charred twigs detached from the crown during intense fires. The infilling of cell lumens by clay minerals took place immediately after burning, in the primary deposition process in aquatic environment. In some cases, the empty spaces left by degraded cell walls were also replaced by minerals (Fig. 5E).

Samples	~2.10-3.30%Ro ~400-550°C	~3.30-4.10%Ro ~550-650°C	~>4.10%Ro ~650 - >800°C	Included Beds
Pb-5258	a 5%	24%	71%	Sandstone
	b 2.83%Ro	3.61%Ro	5.82%Ro	
	c 517°C	609°C	869°C	
Pb-5259	a 2%	40%	58%	Sandstone
	b 3.09%Ro	3.78%Ro	4.79%Ro	
	c 547°C	629°C	748°C	
Pb-5260	a 35%	7%	58%	Siltstone
	b 2.80%Ro	3.65%Ro	6.61%Ro	
	c 513°C	613°C	962°C	
Fire Type				

<sup>a</sup> Percentage of all measurements.

<sup>b</sup> Average inertinite reflectance of selected population.

<sup>c</sup> Estimated burning temperature (T) range based on the equation  $T=184.10+117.76 \times \%Ro$ .

FIGURE 10. Measurements of inertinite reflectance, assumed burning temperatures and possible corresponding fire types (after Petersen and Lindström, 2012).

As demonstrated by Skjemstad et al. (1996), charcoal mechanically breaks down rapidly in modern sediments deposited under semi-arid conditions. The process of impregnation acting as cement at an early stage increased the density of charcoal particles. Thus, although macro-charcoals have been interpreted as evidence of local fires (Clark and Patterson, 1997) the three-dimensional, partially charred logs

dispersed in the sandy matrix could have been transported from a probable original meso-xerophyllous habitat by water and buried at some distance from the burning site.

The presence of a conspicuous, wide growth ring in the tridimensional charred specimens (Fig. 4C) can be an evidence of regional seasonal climate conditions. This is in agreement with the conclusions of Pierini et al. (2002) who, based on analytical methods, suggested an increasingly humid climate towards the top of the Santa Maria-Caturrita lithostratigraphic units, presently included in the Santa Maria I Sequence (Zerfass, 2003, 2004).

The flattened, thin, elongated charred samples (Fig. 4E, F) frequently found in association with the *Dicroidium* assemblage probably represent the burnt basal parts of the pinnate rachises of sub-arborescent *Dicroidium* plants of meso-higrophyllous habitat (Petriella, 1979; Retallack, 1977). The preservation of their fragile structure suggests a very restricted transport from the original site after burning. Charred rachises were previously reported from a burnt filicopsid assemblage from the Albian of Spain, preserved by the action of wildfires in the vegetation growing in freshwater swamp plains (Sender et al., 2015).

Based on the experimental work of Jones et al. (1991), the high-reflecting inertinite in the three-dimensional logs can be estimated to have been formed at temperatures between 517 and 832 °C (sample Pb-5258) and 539-748 °C (sample Pb-5259). The homogenized cell walls observed under FEG confirm that these fragments were partially charred (Fig. 5F-H). In the flattened specimens from the siltstones (sample Pb-5260) the inertinite was formed under temperature values estimated between 513 and 962 °C (Fig. 10).

The organic petrography analysis of the flattened samples ratified the conclusions drawn from SEM observations (Fig. 6D), confirming that the studied material is inertinite (Fig. 6E). The occurrence of lower reflecting inertinite (2.80 %Ro) accounts for 35 % of the measurements and indicates a burning temperature of 513 °C that can be related to ground-surface fires (Scott, 1989, 2000; Scott and Jones, 1994). However, since high temperature fires of 962 °C account for 58 % of the measurements, it suggests that the fire spread up from trunks of sub-arborescent *Dicroidium* plants to the crown (Fig. 10).

Considering the reflectance values of the flattened samples, it can be suggested the burning of fronds from the litter in early stages of surface fires and a rapid

transition from surface to crown fires. The charred material was then subsequently transported for a short distance (hypoautochthonous charcoal) immediately after burning and included in the sedimentary environment together with hypoautochthonous, unburnt *Dicroidium* fronds (Fig. 4F).

The abundance of micro-charcoal (smaller than 180  $\mu\text{m}$ ) suggests a long-distance dispersal by transport. The micro-fragment dispersion through the fine sand facies, scattered in bedding planes, indicates that, in addition to the aerial transport by the smoke plume from crown fires during large wildfire events (Clark et al., 1998), a sedimentological transport and deposition by low density flows was also an active process. This evidence agrees with the facies association described here of fine sandstone facies representing shallow hyperpycnal deposits into lakes triggered by seasonal floods. In a regional context, the present data add new information to the paleoenvironmental interpretation for the deposition of the top of the Santa Maria I Sequence related by Zerfass et al. (2003) to shallow lacustrine deposits.

The suite of charcoal analyses in distinct stratigraphic horizons throughout the studied profile revealed the occurrence of frequent regional wildfires affecting hinterland, meso-xerophyllous coniferous assemblages and marginal hygromesophyllous *Dicroidium*-like assemblages. The burning process involved both high temperature crown and crown-surface interface wildfires. The present data are consistent with those presented by Tanner and Lucas (2016), who reported the presence of charcoal in multiple stratigraphic horizons of the late Triassic (Carnian?) in northern Arizona, southern Utah and northern New Mexico as evidence that wildfires were not unusual occurrences during the Triassic.

The paucity of fusain in Triassic sediments detected by different authors (Chaloner, 1989; Jones et al., 2002; Scott, 2000) was considered as an evidence of low atmospheric  $\text{O}_2$  (13 %) for this time interval and subsidized the model of atmospheric gases for the Phanerozoic constructed by Berner (2006). However, the increasing recognition of charcoal records in Triassic sediments around the world (Tanner and Lucas, 2016) does not corroborate this model, mainly because the occurrence of significant wildfires is incompatible with the prediction of prolonged intervals of low atmospheric  $\text{O}_2$  levels.

Experimental analysis of Belcher and McElwain (2008) associated with the record of Mesozoic charcoals indicated that the lowest atmospheric  $\text{O}_2$  limit of 15-17 % for

combustion should be increased. More recently, the lowest oxygen limit for the spread of wildfires has been raised to 18.5 % (Belcher et al., 2010).

Abu Hamad et al. (2012) discussed possible reasons for the scarce evidence of paleowildfires during the early and middle Triassic worldwide involving different factors such as atmospheric oxygen levels, taphonomic reasons or lack of potential fuel. They considered that none of these factors could presently be identified as being relevant. Based on geological evidence they concluded that the “charcoal gap” or “charcoal depression” inferred for the Lower-Middle Triassic must not necessarily be interpreted as a “wildfire gap” (Uhl et al., 2010).

The results obtained in the present study suggest atmospheric oxygen levels very similar to the model proposed by Bergman et al. (2004) and Glasspool and Scott (2010), being significantly higher than the levels indicated by Berner (2006) through the history reconstruction of the atmospheric oxygen changes across most of the Triassic (Fig. 11).

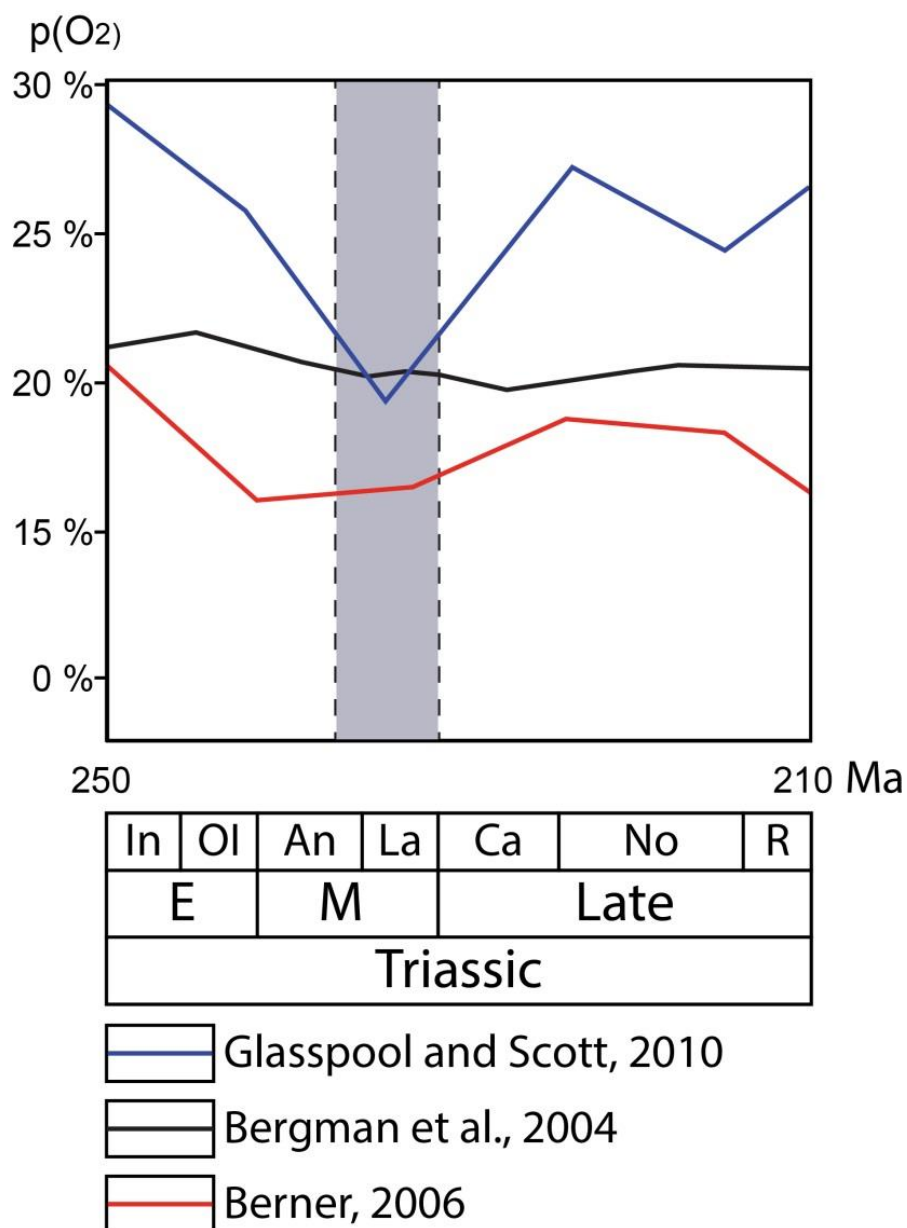


FIGURE 11. Comparison of models for variations in paleoatmospheric  $p(O_2)$  for the Triassic (modified from Tanner et al., 2012). The approximate age of the studied stratigraphic level is represented by the grey vertical bar.

## 6 CONCLUSIONS

The recognition of micro- and macro-charcoal in a vertical facies succession indicates that wildfires were common during the deposition of the Middle Triassic in southern Paraná Basin (Santa Maria Sequence I).

The suite of charcoal data implies wildfire occurrence of regional impact, affecting hinterland, meso-xerophyllous and marginal hygro-mesophyllous habitats of the *Dicroidium* Flora.

The extensive occurrence of charcoal originated by different biomass fuels from distinct paleoenvironments and the expanded geographic distribution of the *Dicroidium* flora point to a higher vegetation density during the middle Triassic in the southern Brazilian Paraná Basin than it was supposed in previous studies. The high concentration of micro-charcoal along of the facies succession indicates regional wildfires derived from seasonal climate conditions. Seasonal floods triggered shallow hyperpycnal flows into the lake depositing the charcoal into distinct facies - the sandstone and the siltstone facies.

The integration of results here obtained through multiple charcoal analyses is consistent with an atmospheric oxygen content over 20 %.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

This study is submitted by the first author, D.S.C., in partial fulfillment of the requirements for the MSc degree at the Programa de Pós-Graduação em Geociências of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul state, Brazil, under the tenure of a scholarship funded by the Programa Petrobras de Formação de Recursos Humanos (PFRH-Petrobras). The first author gratefully acknowledges the financial support of the PFRH-Petrobras and Patricia Zacca for the support with figures edition. The authors thankfully acknowledge Luiz Flávio Lopes (DEP-IG/UFRGS) for the photographs of the hand specimens, Professor Wolfgang Kalkreuth and the Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo at the Universidade Federal do Rio Grande do Sul and the Professor João Graciano Mendonça Filho and the Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica LAFO/DEGL/IGEO/CCMN at Universidade Federal do Rio de Janeiro for the access to their facilities.

## **REFERENCES**

- Abu Hamad, A.A., Kerp, H., Vörding, B., & Bandel, K. (2008). A late Permian flora with *Dicroidium* from the Dead Sea region, Jordan. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 149(3), pp. 85-130.
- Abu Hamad, A.A., Jasper, A., & Uhl, D. (2012). The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: signal for atmospheric oxygen levels,



- taphonomic biases or lack of fuel?. *International Journal of Coal Geology*, 96, pp. 60-71.
- Belcher, C. M., & McElwain, J. C. (2008). Limits for combustion in low O<sub>2</sub> redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic. *Science*, 321(5893), pp. 1197-1200.
- Belcher, C. M., Yearsley, J. M., Hadden, R. M., McElwain, J. C., & Rein, G. (2010). Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from paleoatmospheric oxygen over the past 350 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52), pp. 22448-22453.
- Bergman, N. M., Lenton, T. M., & Watson, A. J. (2004). COPSE: a new model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 304(5), pp. 397-437.
- Berner, R. A. (2002). Examination of hypotheses for the Permo–Triassic boundary extinction by carbon cycle modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(7), pp. 4172-4177.
- Berner, R. A., Beerling, D. J., Dudley, R., Robinson, J. M., & Wildman Jr, R. A. (2003). Phanerozoic atmospheric oxygen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), pp. 105-134.
- Berner, R. A. (2006). A combined model for Phanerozoic atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Geochimica*, 70, pp. 5653-5664.
- Berner, R. A. (2009). Phanerozoic atmospheric oxygen: New results using the GEOCARBSULF model. *American Journal of Science*, 309(7), pp. 603-606.
- Bomfleur, B., Schneider, J., Schöner, R., Viereck-Götte, L., & Kerp, H. (2007). Exceptionally well-preserved Triassic and Early Jurassic floras from North Victoria Land, Antarctica. In *Antarctica: A Keystone in a Changing World—Online Proceedings of the 10th ISAES*, edited by AK Cooper and CR Raymond et al., USGS Open-File Report, 1047, pp. 1-4.
- Bortoluzzi, C.A., Guerra-Sommer, M., & Klepzig, M.C. (1985). Tafloflora Triássica da Formação Santa Maria, RS, Brasil: I-Equisetales, Ginkgoales, Coniferales e Pteridophylla. *VIII Congresso Brasileiro de Paleontologia: 1983 MME-DNPM*, série Geologia, número 27. Paleontologia e Estratigrafia, número 2.
- Bustin, R. M., Link, C., & Goodarzi, F. (1989). Optical properties and chemistry of graptolite periderm following laboratory simulated maturation. *Organic geochemistry*, 14(4), pp. 355-364.

- Chaloner, W. G. (1989). Fossil charcoal as an indicator of palaeoatmospheric oxygen level. *Journal of the Geological Society*, 146(1), pp. 171-174.
- Clark, J. S., & Patterson III, W. A. (1997). Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the paleorecord. In: *Sediment records of biomass burning and global change* (pp. 23-48). Springer Berlin Heidelberg. (Volume 51 of the series NATO ASI Series, pp. 23-48).
- Clark, J. S., Lynch, J., Stocks, B. J., & Goldammer, J. G. (1998). Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, 8(1), pp. 19-29.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.X. (2013; updated 2016). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36(3), pp. 199-204.
- Collinson, M. E. (1999). Scanning electron microscopy of megafossils and mesofossils. *Fossil plants and spores: modern techniques*, 57-64.
- Colombi, C. E., & Parrish, J. T. (2008). Late Triassic environmental evolution in southwestern Pangea: Plant taphonomy of the Ischigualasto Formation. *Palaios*, 23(12), pp. 778-795.
- Da Rosa, A. A. S., Guerra-Sommer, M., & Cazzulo-Klepzig, M. (2013). Passo das Tropas, Santa Maria, RS – Marco bioestratigráfico triássico na evolução paleoflorística do Gondwana na Bacia do Paraná. In: Winge, M. et al. (Ed.). 2013. Sítios geológicos e Paleontológicos do Brasil. Brasília: CPRM, 2013, v.3, 332p.
- Degani-Schmidt, I., Guerra-Sommer, M., de Oliveira Mendonça, J., Mendonça Filho, J. G., Jasper, A., Cazzulo-Klepzig, M., & Iannuzzi, R. (2015). Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). *International Journal of Coal Geology*, 146, pp. 55-67.
- Falkowski, P. G., Katz, M. E., Milligan, A. J., Fennel, K., Cramer, B. S., Aubry, M. P., Berner, R.A., Novacek, M.J., & Zapol, W. M. (2005). The rise of oxygen over the past 205 million years and the evolution of large placental mammals. *Science*, 309(5744), pp. 2202-2204.
- Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International journal of wildland fire*, 18(5), pp. 483-507.
- Glasspool, I. J., Edwards, D., & Axe, L. (2004). Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, 32(5), pp. 381-383.

- Glasspool, I. J., & Scott, A. C. (2010). Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geoscience*, 3(9), pp. 627-630.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., & Iannuzzi, R. (1999). The Triassic taphoflora of the Paraná Basin, southern Brazil: a biostratigraphical approach. *Journal of African Earth Sciences*, 29(1), pp. 243-255.
- Holz, M., & Scherer, C. M. S. (2000). Sedimentological and paleontological evidence of paleoclimatic change during the South Brazilian Triassic: the register of a global trend towards a humid paleoclimate. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, pp. 11-12.
- Jasper, A., Guerra-Sommer, M., Hamad, A. M. A., Bamford, M., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C., Tewari, R., & Uhl, D. (2013). The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent - a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, 24(1), pp. 148-160.
- Jones, T. P., Scott, A. C., & Cope, M. I. C. H. A. E. L. (1991). Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162(2), pp. 193-200.
- Jones, T.P. (1997). Fusain in Late Jurassic sediments from the Witch Ground Graben, North Sea, UK. *Meded. Ned. Inst. Toegep. Geowet. TNO*, 58 (1997), pp. 93–103.
- Jones, T. P., Chaloner, W. G., & Kuhlbusch, T. A. J. (1997). Proposed bio-geological and chemical based terminology for fire-altered plant matter. In *Sediment records of biomass burning and global change* (pp. 9-22). Springer Berlin Heidelberg.
- Jones, T.P., Rowe, N.P. (1999). Embedding techniques: adhesive and resins. In: Jones, T.P., Rowe, N.P. (Eds.), *Fossil Plants and Spores: Modern Techniques*. *Geological Society of London*, pp. 71–75.
- Jones, T. P., Ash, S., & Figueiral, I. (2002). Late Triassic charcoal from Petrified Forest National Park, Arizona, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 188(3), pp. 127-139.
- Kerp, H., Hamad, A. A., Vörding, B., & Bandel, K. (2006). Typical Triassic Gondwanan floral elements in the Upper Permian of the paleotropics. *Geology*, 34(4), pp. 265-268.

- Ketzer, J.M.M., & Ferreira, E. R. (1997). O Registro Estratigráfico Gonduânico Preservado sobre o Escudo Sul-Rio-Grandense. In: III Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná.
- MacDonald, G. M., Larsen, C. P., Szeicz, J. M., & Moser, K. A. (1991). The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews*, 10(1), pp. 53-71.
- Machado, J.P.S.L., Philipp, R. P., Faccini, U. F., Jelinek, A. R., Zvirtes, G. (2015). Tectônica Rúptil Meso e Cenozóica e a Formação do Gráben Arroio Moirão, Santana Da Boa Vista, Piratini, RS. In: IX Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, 2015, Boletim de Resumos IX SSG.
- Manfroi, J., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Francischini, H., Martinelli, A. G., Soares, M. B., & Jasper, A. (2015). Extending the database of Permian palaeo-wildfire on Gondwana: Charcoal remains from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin), Middle Permian, Rio Grande do Sul State, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 436, pp. 77-84.
- McKee, E. D., Crosby, E. T., & Berryhill Jr, H. L. (1967). Flood deposits, Bijou Creek, Colorado, June 1965. *Journal of Sedimentary Research*, 37(3).
- Miall, A. D. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*, 13(1), pp. 1-62.
- Milani, E. J., & Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), pp. 473-484.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., & França, A.B. (2007). Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2), pp. 265-287.
- Petersen, H. I., & Lindström, S. (2012). Synchronous wildfire activity rise and mire deforestation at the Triassic-Jurassic boundary. *PloS one*, 7(10), e47236.
- Petriella, B. (1979). Sinopsis de las Corystospermaceae (Corystospermales, Pteridospermophyta) de Argentina. I. Hojas. *Ameghiniana*, 16 (1979), pp. 81–102.
- Pierini, C., Mizusaki, A. M. P., Scherer, C. M., & Alves, D. B. (2002). Integrated stratigraphic and geochemical study of the Santa Maria and Caturrita formations (Triassic of the Paraná Basin), southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(6), pp. 669-681.

- Philip, R. P., H. Closs, C. L. Schultz, M. Basei, B. L. D. Horn, & M. B. Soares. (2013). Proveniência por U-Pb LA-ICP-MS em zircão detrítico e idade de deposição da Formação Santa Maria, Triássico da Bacia do Paraná, RS: evidências da estruturação do Arco do Rio Grande. *In: VIII Symposium International on Tectonics - XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 2013, Cuiabá. Anais VIII Symposium International on Tectonics - XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 2013.*
- Retallack, G. J. (1977). Reconstructing Triassic vegetation of eastern Australasia: a new approach for the biostratigraphy of Gondwanaland. *Alcheringa*, 1(3), pp. 247-278.
- Scott A. C. (1989). Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, 12 (1989), pp. 443–475.
- Scott, A. C. (2000). The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 164(1), pp. 281-329.
- Scott, A. C. (2010). Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1), pp. 11-39.
- Scott, A. C., & Glasspool, I. J. (2006). The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(29), pp. 10861-10865.
- Scott, A. C., & Jones, T. P. (1994). The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 106(1), pp. 91-112.
- Sender, L. M., Villanueva-Amadoz, U., Pons, D., Diez, J. B., & Ferrer, J. (2015). Singular taphonomic record of a wildfire event from middle Albian deposits of Escucha Formation in northeastern of Spain. *Historical Biology*, 27(3-4), pp. 442-452.
- Skjemstad, J. O., Clarke, P., Taylor, J. A., Oades, J. M., & McClure, S. G. (1996). The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Soil Research*, 34(2), pp. 251-271.
- Tanner, L., Lucas, S., & Zeigler, K. (2006). Rising oxygen levels in the Late Triassic: geological and evolutionary evidence. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, 37 (2006), pp. 5-11.

- Tanner, L. H., Wang, X., & Morabito, A. C. (2012). Fossil charcoal from the Middle Jurassic of the Ordos Basin, China and its paleoatmospheric Implications. *Geoscience Frontiers*, 3(4), pp. 493-502.
- Tanner, L. H., & Lucas, S. G. (2016). Stratigraphic distribution and significance of a 15million-year record of fusain in the Upper Triassic Chinle Group, southwestern USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 461, pp. 261-271.
- Taylor, E. L.; Taylor, T. N.; Krings, M. Paleobotany: the biology and evolution of fossil plants. New York: Academic Press, 2009. 2. ed. 1230 p.
- Uhl, D., Jasper, A., Schindler, T., & Wuttke, M. (2010). First evidence of palaeo-wildfire in the early Middle Triassic (early Anisian) Voltzia Sandstone Fossil-Lagerstätte—the oldest post-Permian macroscopic evidence of wildfire discovered so far. *Palaios*, 25, pp. 837-842.
- Uhl, D., & Montenari, M. (2011). Charcoal as evidence of palaeo-wildfires in the Late Triassic of SW Germany. *Geological Journal*, 46(1), pp. 34-41.
- Willis, K. J., & McElwain, J. C. (2002). The evolution of plants. Oxford, U.K: Oxford University Press.
- Zamuner, A.B., Zavattieri, A.M., Artabe, A.E. and Morel, E.M. (2001). Paleobotánica. In: A.E. Artabe, E.M. Morel and A.B. Zamuner (ed.), El Sistema Triásico en la Argentina, Fundación Museo de La Plata “Francisco Pascasio Moreno”, La Plata, pp. 143-184.
- Zavala, C., Arcuri, M., Di Meglio, M., Diaz, H. G., & Contreras, C. (2011). A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits. In: R. M. Slatt and C. Zavala. (eds). 2011. *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water - Revisiting the Delivery System: AAPG Studies in Geology*, 61, pp. 31-51.
- Zerfass, H., Lavina, E. L., Schultz, C. L., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F., & Chemale, F. (2003). Sequence stratigraphy of continental Triassic strata of Southernmost Brazil: a contribution to Southwestern Gondwana palaeogeography and palaeoclimate. *Sedimentary Geology*, 161(1), pp. 85-105.
- Zerfass, H., Chemale, F., Schultz, C. L., & Lavina, E. (2004). Tectonics and sedimentation in southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*, 166(3), pp. 265-292.