

# **EFEITOS GEOGRÁFICOS E OROGRÁFICOS NA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS NO PARANÁ – ESTUDO PRELIMINAR**

**Cesar Beneti**  
beneti@simepar.br

**Carlos Vasconcellos**  
cav@simepar.br

**Leonardo Calvetti**  
leonardo@simepar.br

**Itamar Adilson Moreira**  
itamar@simepar.br

Instituto Tecnológico SIMEPAR  
Caixa Postal 19100 – Curitiba – PR – CEP 81.531-990

## **ABSTRACT**

In this report we analyze geographic and orographic effects on observed cloud-to-ground lightning exposure in Paraná State. Major emphasis is placed on understanding the mechanisms inducing high concentration of lightning strokes on the flanks to the west of Serra Geral and Ribeira do Iguape canion, and on temporal distribution of lightning in three distinct regions of the state and its relation with observed precipitation. The analysis of spatial distribution of lightning confirms a large variation of stroke densities (Ng) with mean values of 5 strokes/km<sup>2</sup>/year and in some areas values higher than 10 strokes/km<sup>2</sup>/year. Monthly comparisons of precipitation and lightning were made based on a short period of data (6 years). This preliminary study has allowed us to begin to comprehend the frequent severe weather events in Paraná. We expect to, in the future, using information from other hydro-meteorological observation systems and numerical models to understand the mechanisms and improve our forecasting abilities related to those storms with strong precipitation and lightning.

## **1. INTRODUÇÃO**

É internacionalmente reconhecido que as descargas elétricas atmosféricas são a principal causa dos desligamentos não programados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, representando entre 40% a 60% desses desligamentos, e com valores ainda maiores quando há alta incidência de descargas em terrenos de alta resistividade. Além disso, curto-circuitos causados pelas descargas elétricas, ainda que eliminados pelas proteções, causam quedas de tensão que são um dos tipos de defeitos na qualidade de energia fornecida que mais causam problemas aos consumidores industriais com processos controlados eletronicamente. Então, uma melhor compreensão do fenômeno é fundamental para reduzir o impacto dos descargas atmosféricas nos sistemas de transmissão e distribuição.

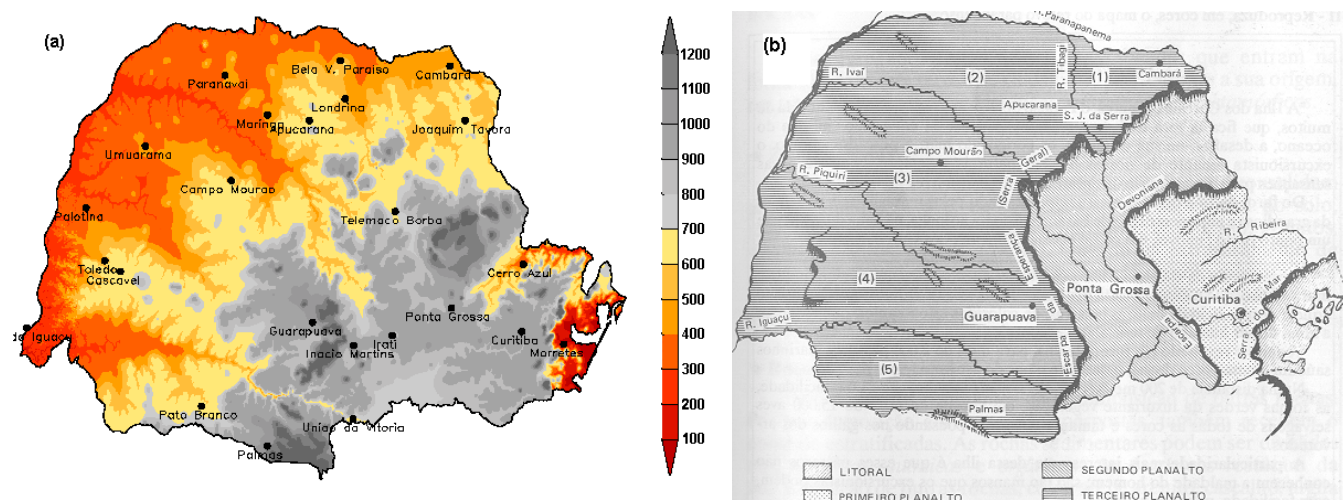
A determinação de padrões de ocorrência de descargas atmosféricas tem aplicação imediata na identificação de áreas alvo para a companhia de energia elétrica, onde aperfeiçoamentos na proteção contra descargas atmosféricas trariam melhorias no desempenho das linhas de transmissão e distribuição. Assim, como objetivo inicial de pesquisa foi definida a identificação da possível relação entre a geografia e a orografia do estado e a distribuição espacial e temporal das descargas atmosféricas.

## **2. A GEOGRAFIA DO PARANÁ**

O Paraná está localizado entre as latitudes 22°30'S e 26°43'S, e longitudes 48°02'W and 54°38'W, com uma área de aproximadamente 199.709 quilômetros quadrados. A geografia do estado (Maack, 1981) é caracterizada por um conjunto de planaltos que chegam a alturas acima de 1.000 metros e caem, a oeste, para altitudes de 300 metros acompanhando o rio Paraná, conforme indica a Figura 1a, que ilustra as diversas altitudes observadas do relevo.

Quatro regiões fisiográficas distintas se desenvolvem ao longo do estado na orientação leste-oeste, conforme mostra a Figura 1b. A primeira região identificável é a de Planícies Costeiras (Baixada Litorânea), uma faixa de

terra de 20 km composta de rochas sedimentares recentes com morros isolados de rochas cristalinas salientes. O exíguo litoral paranaense é formado por estuários que desembocam em baías, em particular a Baía de Paranaguá.



**Figura 1** – (a) Relevo do Paraná; (b) Regiões Fisiográficas (Maack 1981)

A parte ocidental das planícies costeiras estende-se até o pé da Serra do Mar, fronteira leste do Primeiro Planalto paranaense ou Planalto Cristalino. Altitudes médias estão na faixa de 850 a 900 metros no primeiro planalto. As montanhas mais altas na topografia do estado podem ser encontradas no Primeiro Planalto, incluindo o pico Paraná, o ápice do estado do Paraná com 1.965 metros, e o pico Caratuba com 1.939 metros. Outro destaque nesta topografia é o vale do rio Ribeira do Iguape. Esculpido na porção nordeste do primeiro planalto, o vale do Ribeira do Iguape estende-se por mais de 200 quilômetros (metade deste comprimento dentro do Paraná).

O Segundo Planalto ou Planalto Ponta Grossa ou, ainda, Planalto Sedimentar Paleozóico apresenta forma típica de cuestas. A frente ocidental desta formação apresenta montanhas crescendo 400 metros sobre o Planalto Cristalino. A rampa suave do Segundo Planalto se dá na direção oeste e muda de altitudes de 1.300 metros no ápice da cuesta para 500 metros na base da formação montanhosa da Serra Geral.

O terceiro planalto ou Planalto Arenítico-Basáltico é o maior em área entre as quatro unidades morfológicas e inclui mais da metade do território paranaense. Este planalto, constituído principalmente por rochas ígneas, começa nos cumes da Serra Geral (parte do Planalto Meridional do Brasil e com altitudes de até 1.250 metros) e desce até o rio Paraná, fronteira natural entre o Brasil e o Paraguai.

Com uma geografia tão diversificada, pode-se esperar que a ocorrência de descargas atmosféricas não tenha uma distribuição uniforme em todo o Paraná, especialmente devido às grandes variações mostradas pela orografia do estado. É o objetivo deste trabalho construir hipóteses de como a geografia descrita, e orografia correspondente, afeta a distribuição de descargas atmosféricas nuvem-terra observada no Paraná.

### 3. SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Desde 1996 o SIMEPAR opera o Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas, que utiliza a tecnologia denominada “Sistema de Localização e Rastreamento de Raios” (“Lightning Positioning and Tracking System” – LPATS) da Global Atmospheric Inc. (GAI). O LPATS processa dados transmitidos dos sensores remotos sincronizados através do Sistema de Posicionamento Global (“Global Positioning System”, GPS), proporcionando informações de temporização de raios com resoluções de até 100 nanossegundos, e indicando, além da localização e tempo da ocorrência da descarga, a polaridade e amplitude máxima da corrente de retorno (em kA).

A Figura 2 apresenta o diagrama da central de processamento, visualização e armazenamento do LPATS no SIMEPAR. Os sinais dos sensores são transmitidos através de canais de comunicação dedicados a um ambiente computacional que configura, monitora, coleta, armazena e processa as informações detectadas pelos sensores remotos. As posições dos raios e os parâmetros relacionados (intensidade e polaridade) são obtidas usando uma combinação de informações de ângulo, tempo e intensidade do sinal.

A visualização das informações é feita através de computadores conectados diretamente à central de processamento ou ao sistema de banco de dados do SIMEPAR, uma vez que os dados são transferidos em tempo real para um sistema de armazenamento de dados hidro-meteorológicos, estando em poucos segundos disponíveis para utilização em aplicativos de visualização e análise de dados. (Beneti e Vasconcellos 2002).

Um convênio entre o SIMEPAR e companhias do setor elétrico brasileiro, FURNAS e CEMIG, assinado em 1998 formou a RIDAT – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil, com objetivos de intercâmbio de informações técnico-científicas, integração dos dados e sinais dos sensores de detecção e operação conjunta (Beneti e outros, 2000). Com a integração estendeu-se a área de monitoramento e, por consequência, melhora-se a eficiência de detecção e precisão da informação de localização das descargas elétricas atmosféricas. Atualmente a RIDAT mantém sensores em Minas Gerais, Goiás, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. A rede atual detecta descargas atmosféricas no sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, além do Paraguai, Uruguai e nordeste da Argentina.

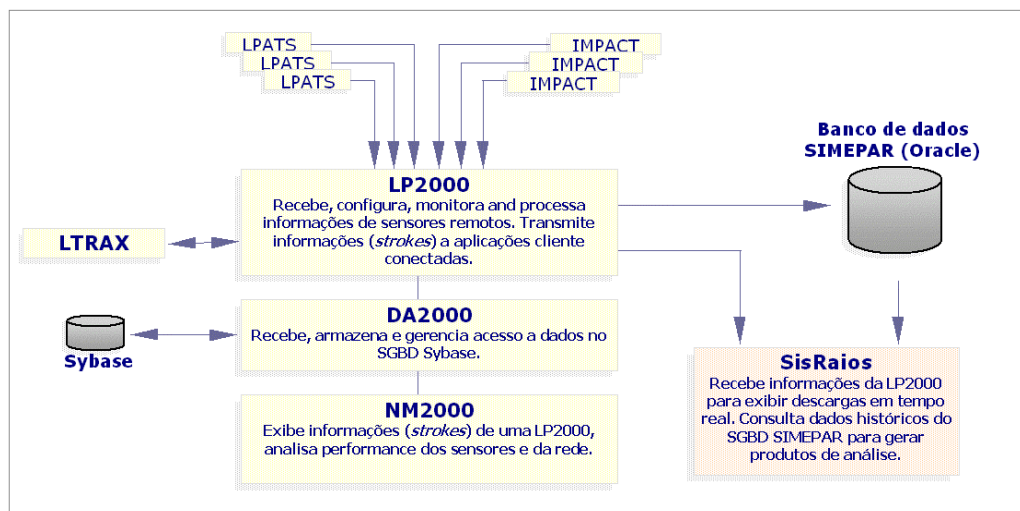


Figura 2 – Diagrama do sistema de detecção de descargas atmosféricas do SIMEPAR.

#### 4. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO PARANÁ

Informações de densidade de descargas atmosféricas são um ponto de partida na busca de padrões de distribuição. Uma amostra de aproximadamente 8,7 milhões de descargas atmosféricas nuvem-terra detectadas na área do estado do Paraná durante o período de 1996 a 2001 foram utilizadas para construir uma matriz de densidade de descargas atmosféricas. A Figura 3 mostra a distribuição espacial de densidade de descargas atmosféricas (raios/km<sup>2</sup>/ano) para o Paraná no período considerado, com resolução de 20x20km.

Apesar da grande amostra de descargas, o número limitado de anos considerados impede qualquer estudo climatológico conclusivo. Entretanto, os dados históricos disponíveis foram considerados apropriados para formular hipóteses de possíveis correlações entre a orografia e geografia do estado e a incidência de descargas atmosféricas nuvem-terra.

A influência orográfica no desenvolvimento e distribuição espacial de precipitação e descargas atmosféricas tem sido foco de numerosos estudos (López e outros 1997; Barros e outros 1998, Pinto e outros 1999). Uma vez que as atividades elétricas estão associadas ao desenvolvimento de nuvens cumulonimbus e eventuais processos de eletrificação, é importante entender os fatores que influenciam as condições do tempo na região analisada.

As condições de tempo no Paraná estão geralmente associadas às incursões de massas de ar polar para o equador e às áreas de nebulosidade convectiva associadas a frentes frias extratropicais, além das áreas de instabilidade local associadas a complexos convectivos em mesoescala, linhas de instabilidade, nuvens convectivas, forte precipitação e relâmpagos. A incursão do ar quente e úmido que se desloca desde a região norte e central do Brasil além da Bolívia mantém condições apropriadas para formação de tempestades durante o verão e a primavera nas regiões mais a oeste do Paraná, enquanto a trajetória das massas polares durante o verão e as variações de temperaturas da superfície do Oceano Atlântico influenciam diretamente a faixa litorânea do Paraná, até o Primeiro Planalto (Kim e outros 2000).

A precipitação média acumulada anual varia de 1.300 a 2.000 mm em todo o estado, com uma distribuição espacial que pode ser dividida em três áreas:

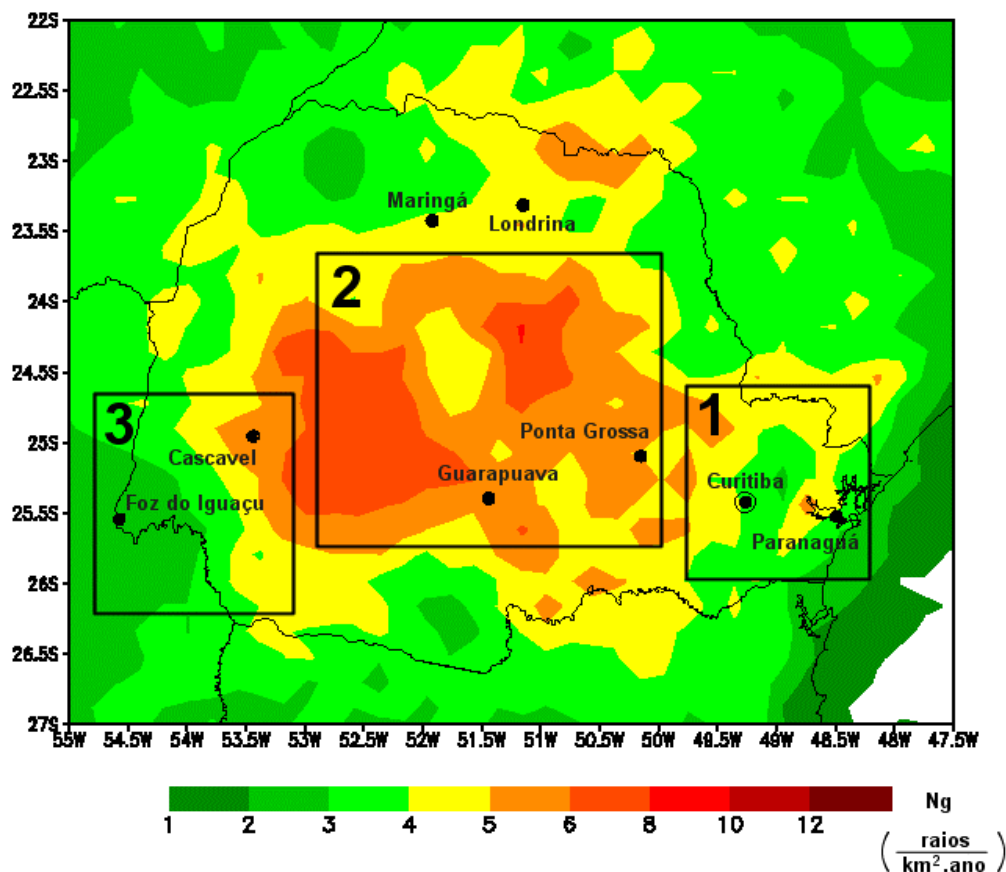
- Serra do Mar - planícies costeiras e cume, uma região com os maiores valores de precipitação total média, acima de 1.900 mm por ano.
- Vale do Ribeira do Iguapé - com os menores valores de precipitação (de 1.300 a 1.400 mm por ano) e aproximadamente 150 km de distância da costa.

- Serra Geral - aproximadamente 300 km a oeste da costa, a orografia é dominada pela parte norte da Serra Geral, com altitude acima de 1.200 metros, e com precipitação anual acima de 1.800 mm.

A Figura 3 mostra que, como esperado, as densidades de descargas atmosféricas não são espacialmente uniformes em todo o Paraná. Foram assinaladas três regiões com características distintas no Paraná:

- Região 1 – Vale do Ribeira e litoral
- Região 2 – Serra Geral
- Região 3 – Bacia do Paraná e lago de Itaipú

Um grande conjunto é claramente visível na área correspondente à Serra Geral (região 2), com densidade de descargas atmosféricas acima da média ( $Ng \geq 5$ ), decaindo para valores menores ( $Ng < 4$ ) nas bacias do rio Paraná, a oeste das encostas da Serra Geral. Outro aspecto interessante é que as maiores densidades estão concentradas nos flancos do vale do Ribeira do Iguapé (região 1). Quando comparado com a orografia da região, valores maiores são observados na parte sul do vale, onde uma rampa abrupta cria condições para desenvolvimento de forte convecção e, assim, nuvens cumulonimbus com grande extensão vertical, com todas as condições necessárias para a ocorrência de descargas atmosféricas. O leste do Paraná, compreendendo a região metropolitana de Curitiba e litoral (região 1) apresenta valores menores de densidade de descargas (em geral, abaixo de  $Ng=4$ ), embora tenha os maiores valores de precipitação do estado.

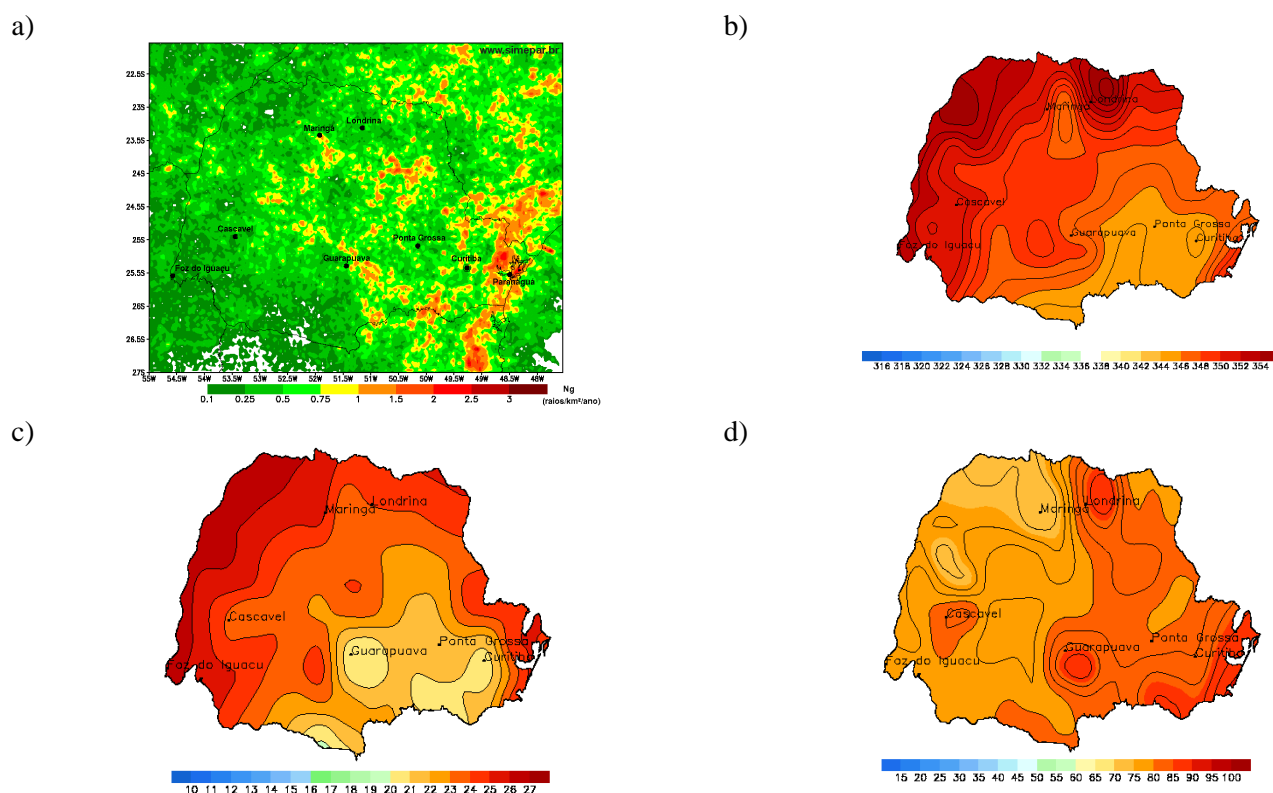


**Figura 3** – Densidade de descargas atmosféricas no Paraná – média para o período 1996 a 2001.

Valores climatológicos de direção do vento são predominantemente de nordeste, associados à influência dos sistemas de alta pressão sobre o Atlântico. No vale do Ribeira do Iguapé esta direção preferencial do vento contribui para a constante advecção de umidade para a área, com o ar quente e úmido vindo da costa e penetrando através do vale do rio durante o ano inteiro. Também as fortes correntes convectivas iniciadas por gradientes térmicos vale-montanha na parte sul do vale ajudam no crescimento das tempestades com grande extensão vertical. As mesmas condições de vento são responsáveis pelos altos níveis de precipitação da região costeira. Neste caso, há um baixo número de descargas atmosféricas, não somente por causa da proximidade do oceano, mas, nesta área, a precipitação deve-se principalmente a nuvens estratiformes baixas, sem a extensão vertical necessária para criar condições favoráveis à separação das partículas carregadas e conseqüente ocorrência das descargas atmosféricas.

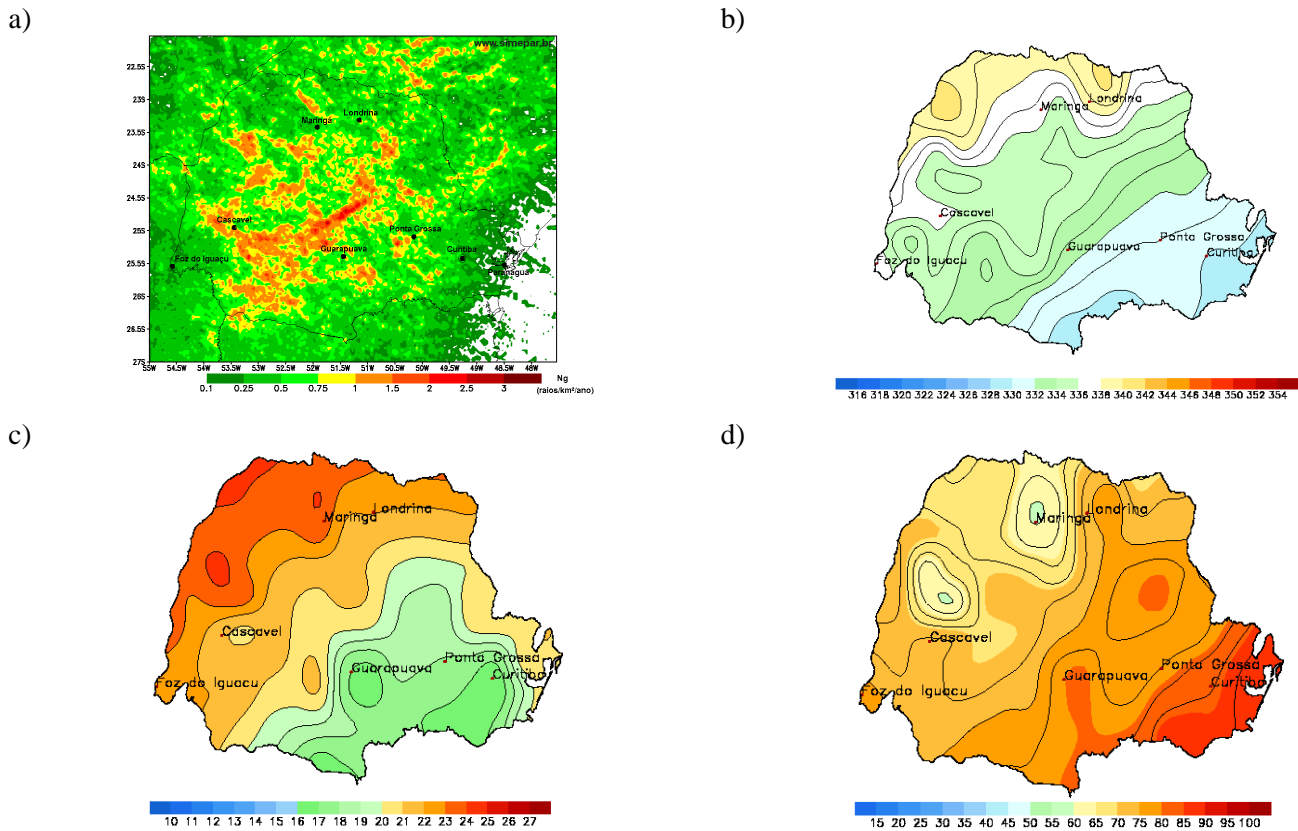
Por outro lado, a direção noroeste do vento não é favorável às altas frequências de tempestades com descargas atmosféricas observadas no flanco leste da Serra Geral. Nesta região, altos valores de precipitação são principalmente associados à circulação dos sistemas de baixa pressão do Paraguai e regiões centro-oeste do Brasil, que são a fonte para instabilidades locais como as linhas de instabilidade. No flanco oeste (região 3), sistemas atmosféricos que chegam à área trazem ar troposférico quente e úmido avançando sobre uma bacia fluvial de mais de 200 km de extensão. O levantamento forçado de parcelas de ar através dos flancos das montanhas, a advecção diferencial do ar úmido e alto e também as correntes de ar vale-montanha são uma influência positiva para a grande densidade de descargas atmosféricas medidas na área. Esta região tem sido identificada com eventos de tempo severo (chuva e vento de moderado a forte, alta densidade de ocorrência de descargas atmosféricas).

Na figura 4, estão representados os valores médios para o mês de janeiro, de densidades de descargas atmosféricas, temperatura potencial equivalente, temperatura do ar, e umidade relativa. Uma maior concentração de descargas atmosféricas é observada na Região 1 (Vale do Ribeira e Serra do Mar), onde os fluxos de umidade vindos do mar são forçadas a transpor os obstáculos naturais, associados as temperaturas elevadas registradas nesta região, provocando o desenvolvimento de áreas convectivas e gerando fortes instabilidades nesta região. Fato este que não é observado sobre o noroeste e oeste paranaense, onde se observa uma região com valores médios de temperatura potencial equivalente e temperatura do ar (Fig. 4 b e c, respectivamente) mais elevados, devido ao fato de ter valores mais baixos de umidade.



**Figura 4** – Valores médios para o mês de janeiro dos anos de 1996 - 2001 (a) Densidade de descargas atmosféricas, (b) Temperatura potencial equivalente, (c) Temperatura, (d) Umidade relativa.

Na figura 5, os mesmos campos da figura anterior são mostrados para o mês de outubro, quando são observadas algumas mudanças em relação aos valores observados em janeiro. A região com maior incidência de descargas atmosféricas é a Região 2 (Serra Geral), onde os sistemas locais favorecem ao desenvolvimento frequente de tempestades com descargas atmosféricas observadas no flanco leste da Serra Geral. Nesta região, os sistemas de instabilidades são alimentados pela circulação dos sistemas de baixa pressão do Paraguai e regiões centro-oeste do Brasil. A ascensão forçada desta massa de ar nas encostas das montanhas, onde as correntes de ar vale-montanha tem uma grande influência para a grande densidade de descargas atmosféricas.



**Figura 5** – Valores médios para o mês de outubro dos anos de 1996 - 2001 (a) Densidade de descargas atmosféricas, (b) Temperatura potencial equivalente, (c) Temperatura, (d) Umidade relativa.

## 5. DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO PARANÁ

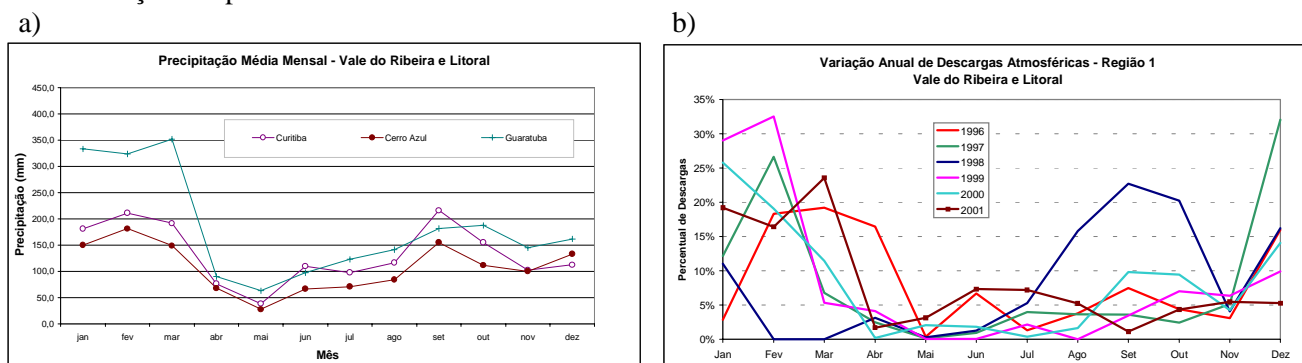
As descargas atmosféricas variam significativamente mês a mês e têm uma forte relação com a distribuição temporal de precipitação. A respeito dos valores médios de precipitação mensal acumulada para as três áreas identificadas, foram selecionadas estações meteorológicas automáticas do SIMEPAR para representar a distribuição de chuva ao longo do ano.

No caso da região 1 (Vale do Ribeira do Iguape e litoral), a Figura 6 apresenta os valores médios mensais de precipitação e número total de descargas atmosféricas detectadas (valores mensais). A precipitação acumulada anual variou de 1.300mm em Cerro Azul até 1.600mm em Curitiba e 2.200mm no litoral (Guarapuava), durante o período analisado (1996 a 2000). Vale notar que a estação de Cerro Azul está próxima à região do vale do Ribeira, indicando que embora tenha precipitação menor que o restante da região leste o alto número de descargas atmosféricas na região estão associadas a poucos eventos convectivos. Quando comparados os valores mensais de precipitação e de incidência de descargas atmosféricas, fica bastante clara a correlação para esta região, com valores máximos de ocorrência de descargas atmosféricas nos meses de verão (de dezembro a fevereiro) e um segundo pico nos meses de setembro e outubro.

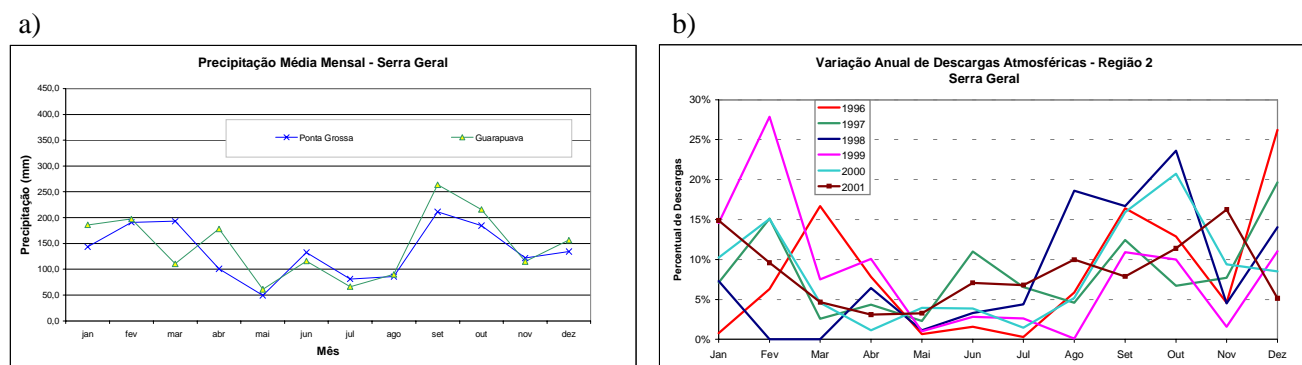
Na região 2 (Serra Geral), a Figura 7 mostra as variações anuais representando o inverno habitual pouco úmido, o verão úmido do sul do Brasil e os meses de dezembro, janeiro e fevereiro com as maiores precipitações. O segundo pico de descargas atmosféricas e precipitação nessa região nos meses de setembro a novembro, com valores máximos próximos ao período de verão (dezembro a março) também mostram a influência das linhas de instabilidade sobre o sul do Brasil, e, conseqüentemente, com a presença de descargas atmosféricas e tempestades. Também para esta região, percebe-se boa correlação entre valores mensais de precipitação e máximos de descargas atmosféricas.

Na região da bacia do Paraná e lago de Itaipú (região 3), onde os valores de precipitação também foram elevados durante o período de 1996 a 2000 (com valores médios anuais de 1.800mm para Cascavel e 2.300mm para Foz do Iguacu), a variação anual da precipitação e da incidência de descargas atmosféricas não é muito grande, como mostra a Figura 8. A precipitação é bem distribuída durante o ano, com valores menores durante o inverno, sem picos pronunciados. O mesmo ocorre para a variação anual de descargas atmosféricas, com exceção dos valores ligeiramente maiores durante os meses de agosto a outubro, também associados à presença de complexos convectivos nessa região.

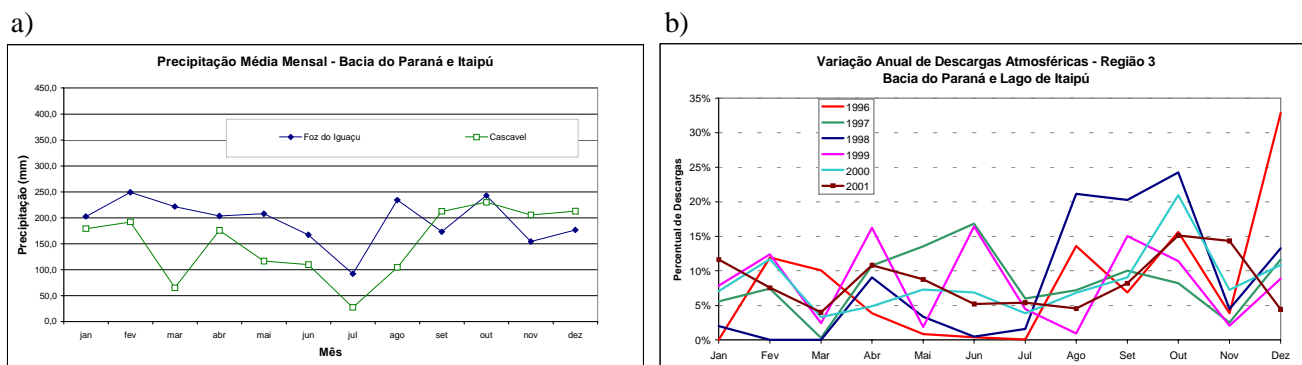
De modo geral, a variação anual de precipitação e incidência de descargas atmosféricas no Paraná apresenta boa correlação, como já era de se esperar. Porém, devido ao pequeno período de observação (5 anos), e também devido à atuação de fenômenos de circulação atmosférica global (El Niño e La Niña) durante esse período, os resultados apresentados devem ser considerados preliminares, sendo necessário maior quantidade de dados para investigar essa distribuição temporal.



**Figura 6** – (a) Precipitação média mensal registrada nas estações de Curitiba, Cerro Azul e Guaratuba; e (b) Variação anual percentual de descargas atmosféricas detectadas na região 1 (Vale do Ribeira e Litoral).



**Figura 7** – (a) Precipitação média mensal registrada nas estações de Ponta Grossa e Guarapuava; e (b) Variação anual percentual de descargas atmosféricas detectadas na região 2 (Serra Geral).



**Figura 8** – (a) Precipitação média mensal registrada nas estações de Foz do Iguaçu e Cascavel; e (b) Variação anual percentual de descargas atmosféricas detectadas na região 3 (bacia do Paraná e Itaipú).

## 6. CONCLUSÕES

O SIMEPAR opera, desde 1996, um sistema de detecção de descargas atmosféricas que permite mapear a incidência de descargas com alta eficiência e precisão. Para analisar os efeitos geográficos e orográficos na incidência de descargas atmosféricas no Paraná, foram processados mais de 8,7 milhões de descargas elétricas atmosféricas ocorridas entre 1996 e 2001.

A análise da incidência das descargas observadas e da geografia do estado confirmaram a grande variação espacial da densidade de descargas (Ng). O efeito da orografia, juntamente com os padrões de circulação atmosférica no estado, determina os altos valores encontrados em regiões bem definidas como vale do rio Ribeira do Iguape e nas

encostas a oeste da Serra Geral. Os valores médios observados para todo o estado foram menores de 5 raios/km<sup>2</sup>/ano, enquanto que nas regiões mencionadas são encontrados valores maiores de 10 raios/km<sup>2</sup>/ano.

Foram inicialmente selecionadas três regiões do estado com características distintas de distribuição da precipitação anual e incidência de descargas atmosféricas, para análise.

A região compreendendo o Vale do Ribeira no Primeiro Planalto e Litoral apresenta altos índices de precipitação anual porém baixos valores de densidade de descargas atmosféricas, uma vez que a maior parte da precipitação está associada à circulação marítima associada a nuvens estratiformes. Os valores altos de densidade de descargas atmosféricas na região do Ribeira exemplificam a associação entre circulação do ar e orografia no aumento de ocorrência de tempestades nas encostas.

A Serra Geral apresenta altos valores de densidade de descargas atmosféricas que estão associadas principalmente ao efeito da orografia na intensificação da instabilidade atmosférica na região. Linhas de instabilidade e os sistemas frontais são os principais sistemas de tempo que propiciam a maior incidência de descargas atmosféricas na Serra Geral. A distribuição espacial das descargas nessa região ainda merece ser melhor estudada, comparando-se com mais detalhe a circulação do ar na região e a orografia, para melhor compreender os valores encontrados.

A Bacia do Rio Paraná e região do Lago de Itaipú, que também tem distribuição de descargas atmosféricas diferenciada, apresenta valores altos durante os meses de agosto a setembro, porém inferiores aos encontrados na Serra Geral e Vale do Ribeira.

A variação anual das tempestades elétricas apresenta forte correlação com a precipitação observada nas três regiões selecionadas, com a maior parte da chuva e das descargas elétricas nos meses de primavera e verão. Porém, como em parte do período observado os fenômenos de El Niño e La Niña estavam atuando no sul do Brasil, e ainda o período de dados de descargas atmosféricas é pequeno (6 anos), as conclusões sobre variação temporal e espacial das tempestades elétricas como apresentadas neste relatório devem ser consideradas com cautela.

Este estudo preliminar nos permitiu iniciar a compreensão dos frequentes eventos de tempo severo no Paraná, identificando a distribuição espacial e temporal dos mesmos e as relações entre tempestades elétricas e geografia do estado, em especial a orografia, e também entre a distribuição espacial e temporal das descargas e os mecanismos de circulação do ar que intensificam as tempestades nas diversas regiões do estado.

Esperamos, no futuro, usando informações integradas do sistema de detecção de descargas atmosféricas em conjunto com radares meteorológicos e outros sistemas de monitoramento, além de modelos numéricos de previsão do tempo, melhorar nossas habilidades de previsão relacionadas àquelas tempestades com forte precipitação e descargas atmosféricas.

## REFERÊNCIAS

- Barros, A.P., Kuligowski R.J. Orographic effects during a severe wintertime rainstorm in the appalachian mountains. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2648-2672. 1998.
- Beneti, C.A.A., Leite E. A., Garcia S. A. M., Assunção L. A. R., Cazeta Filho A., Reis R. J. RIDAT – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil: situação atual, aplicações e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, Rio de Janeiro, RJ. 2000.
- Beneti, C. A. A., Vasconcellos, C. A.: SISRAIOS – Um sistema interativo de análise e visualização de descargas atmosféricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, Foz do Iguaçu, PR. 2002.
- Kim, I.S., Duquia, C.G., Calvetti, L. Regionalização do estado do Paraná com utilização dos campos de precipitação, temperatura mínima e máxima. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, Rio de Janeiro, RJ. 2000.
- López, R.E., Holle, R.L., Watson, A.I. Spatial and temporal distributions of lightning over Arizona from a power utility perspective. *J. Applied Meteorology*, 36, 825-831. 1997.
- Maack, Reinhard, Geografia Física do Estado do Paraná. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1981.
- Pinto Jr., O, Pinto, I.R.C.A., Gomes, M.A.S.S., Vitorello, I., Padilha, A.L. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993. 1. Geographical distribution. *J. Geo. Res.*, 104 (D24), 31,369-31,379. 1999.