

Precipitação provável na Bacia Hidrográfica do Rio Formoso, Tocantins

Kaio Cesar Cardoso de Lima Fonseca Alves¹, Marcelo Ribeiro Viola², Carlos Rogério de Mello²,
Marcos Giongo¹, Gilberto Coelho²

¹ Universidade Federal do Tocantins. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais – Gurupi, Tocantins. E-mail: kcclfa@uft.edu.br; giongo@uft.edu.br

² Universidade Federal de Lavras. Departamento de Engenharia. Núcleo de Engenharia de Água e Solo – Lavras, Minas Gerais. E-mail: marcelo.viola@deg.ufla.br; crmello@deg.ufla.br; coelho@deg.ufla.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi mapear a precipitação provável quinzenal durante a estação chuvosa (outubro a abril) na bacia hidrográfica do rio Formoso, por meio de técnicas geoestatísticas. A partir de séries históricas de 40 postos pluviométricos, as lâminas prováveis com 75% ($P_{p75\%}$) e 90% ($P_{p90\%}$) de probabilidade de excedência foram calculadas pela distribuição de probabilidades Log-Normal, tendo sido aplicado o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de significância de 5%. Na análise geoestatística foram ajustados os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano pelo método dos mínimos quadrados ponderados (MQP), sendo adotado para o mapeamento o modelo que produziu menor erro médio na validação cruzada. Os resultados do teste KS mostraram que a distribuição Log-Normal foi adequada em 98,9% dos eventos. Na aplicação das técnicas geoestatísticas o modelo esférico se sobressaiu em 50% das análises. Os resultados mostraram que a precipitação provável quinzenal apresenta considerável variabilidade espaço-temporal, com valor médio quinzenal para a bacia variando de 4 mm a 82 mm entre outubro e abril, com maiores lâminas estimadas para a região norte da bacia em outubro, março e abril. Em termos médios para todo o período chuvoso a $P_{p75\%}$ e $P_{p90\%}$ representam 40,1% e 25% da precipitação média observada na bacia, respectivamente.

Palavras Chave: Geoestatística; Veranico; Hidrologia.

Probable precipitation in Formoso River basin, Tocantins

Abstract: The objective of this study was to map the probable fortnightly precipitation during the rainy season (from October to April) in Formoso river basin, using geostatistical techniques. From long-term precipitation data set of 40 rain-gauge stations, the probable depth with 75% ($P_{p75\%}$) and 90% ($P_{p90\%}$) probability of exceedance were calculated based on Log-Normal Probability Distribution, which was tested by means of adherence Kolmogorov-Smirnov test (KS) at a significance level of 5%. For geostatistical analysis, the Exponential, Spherical and Gaussian semivariogram models were adjusted by weighted least squares method, being taking into account for mapping, the model that produced lower mean error obtained from cross-validation. The results from KS test showed that the Log-Normal distribution was adequate in 98.9% of the long-term rainfall series analyzed. The results from geostatistical techniques application, the spherical model can be highlighted since it was the most effective model for 50% of the studied cases. The results showed yet that the probable fortnightly precipitation has presented considerable spatiotemporal variability, with average value for the basin ranging from 4 mm (October) to 82 mm (December), and the highest estimated values was obtained for the northern basin for the months of October, March and April. On average, for the rainy season as a whole, $P_{p75\%}$ and $P_{p90\%}$ represent, respectively, 40.1% and 25% of average precipitation.

Keywords: Geostatistics; Dry spells; Hydrology.

Introdução

A estimativa da precipitação com determinado nível de probabilidade é essencial para o planejamento agrícola, pois possibilita a previsão da melhor época para o plantio, preparo do solo, colheita, semeadura, adubação e aplicação de defensivos (Ávila et al., 2009), além de possibilitar o planejamento eficiente de irrigações suplementares, permitindo a otimização da água disponível, e concedendo ao agricultor maior confiabilidade na tomada de decisão (Morais et al., 2001; Silva et al., 2007; Danfá et al., 2011). Dourado Neto et al. (2005), destacam ainda que esses estudos permitem a previsibilidade do comportamento climático de uma região, sendo ferramenta fundamental no planejamento e gestão de inúmeras atividades agropecuárias e humanas.

Conceitua-se precipitação provável como sendo a precipitação pluvial mínima que apresenta probabilidade específica de excedência baseada em uma série histórica de dados, ou seja, é o valor de precipitação mínimo esperado em determinado local, época do ano e para determinado nível de probabilidade (Haan, 2002). Geralmente, quando se estuda a precipitação provável para fins agrícolas, o nível de probabilidade mais recomendado é de 75%, ou seja, uma lâmina mínima a ser garantida para um determinado período e local, em três de cada quatro anos (Bernardo et al., 2006).

A quantificação da precipitação provável é obtida mediante o ajuste de modelos teóricos de probabilidades a séries históricas, sendo essencial avaliar a capacidade preditiva destes modelos por meio de testes de aderência (Ávila et al., 2009). Destacam-se no estudo da precipitação provável as distribuições Gama (Longo et al., 2006; Ribeiro et al., 2007; Sampaio et al., 2007; Silva et al., 2007) e a Log-Normal (Junqueira Júnior et al., 2007; Ribeiro et al., 2007), sendo que esta última, de acordo com Mello et al. (1994), tem sido amplamente utilizada em estudos aplicados a bacias hidrográficas.

A geração de mapas que detalhem o regime pluvial, visando subsidiar a tomada de decisão por múltiplos setores ligados à gestão dos recursos naturais, é uma importante demanda na região norte do Brasil. Com este objetivo, são aplicadas técnicas de interpolação espacial, disponibilizando mapas de superfície que possibilitam a descrição do comportamento espaço-temporal da variável. Diversos estudos tem sido conduzidos com o objetivo de avaliar metodologias para o mapeamento da precipitação, podendo-se destacar as qualidades das técnicas geoestatísticas em comparação a outros interpoladores (Mello et al., 2003; Melo Júnior et al., 2006; Gomes et al., 2007; Mello et al., 2007; Mello et

al., 2008; Viola et al., 2010; Santos et al., 2011; Mello et al., 2012; Mello & Viola, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Formoso está localizada na região sudoeste do Estado do Tocantins. Neste importante afluente do rio Araguaia, a agropecuária é a atividade econômica predominante (Tocantins, 2007), sendo que o principal uso de água é para irrigação, com destaque para o Projeto Rio Formoso. De acordo com o Plano de Bacia Hidrográfica do rio Formoso (Tocantins, 2007), o desenvolvimento de planos de ações voltados ao uso sustentável dos recursos hídricos são prioridade, visando minimizar os conflitos pelo uso da água decorrentes do longo período de déficit hídrico observado nesta região. Desta maneira, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de estudos hidrológicos na bacia do rio Formoso, visando fornecer informações que possibilitem o planejamento, e por consequência, a otimização dos recursos hídricos disponíveis. De acordo com Vergara et al. (2013), estudos sobre o regime pluvial nesta região são de extrema importância, pois possibilitam o reconhecimento da sazonalidade e o planejamento da agricultura de terras altas e irrigada.

Neste contexto, objetivou-se desenvolver o mapeamento da precipitação provável quinzenal com probabilidades de 75% e 90% de excedência, ao longo do período chuvoso na bacia hidrográfica do rio Formoso (outubro a abril), com o emprego de técnicas geoestatísticas. Tal abordagem é relevante no sentido de fornecer informações que propiciem a redução dos riscos decorrentes do desconhecimento da frequência das chuvas, corroborando com a capacidade produtiva e fornecendo subsídios técnicos direcionadores para a gestão dos recursos hídricos.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo e banco de dados

O presente estudo contempla a bacia hidrográfica do rio Formoso (Figura 1), localizada entre as latitudes 10°28' e 13°16' S e longitudes 48°50' e 49°57' W. O rio Formoso é um importante afluente pela margem direita do rio Araguaia, com área de drenagem de 21.328,57 km² (Tocantins, 2007). A bacia é subdividida em seis sub-bacias hidrográficas na divisão hidrográfica estadual, sendo: rio Pau Seco, rio Xavante, rio Dueré, rio Piaus, rio Urubu e rio Formoso (Tocantins, 2012).

A bacia abrange parte do território de 21 municípios dos estados do Tocantins e Goiás, e que apresentam diferentes percentuais de participação no domínio físico da bacia, sendo eles: a) Estado do Tocantins: Aliança do Tocantins, Alvorada, Araguaçu, Cariri do Tocantins, Cristalândia, Crixás do Tocantins, Dueré, Fátima,

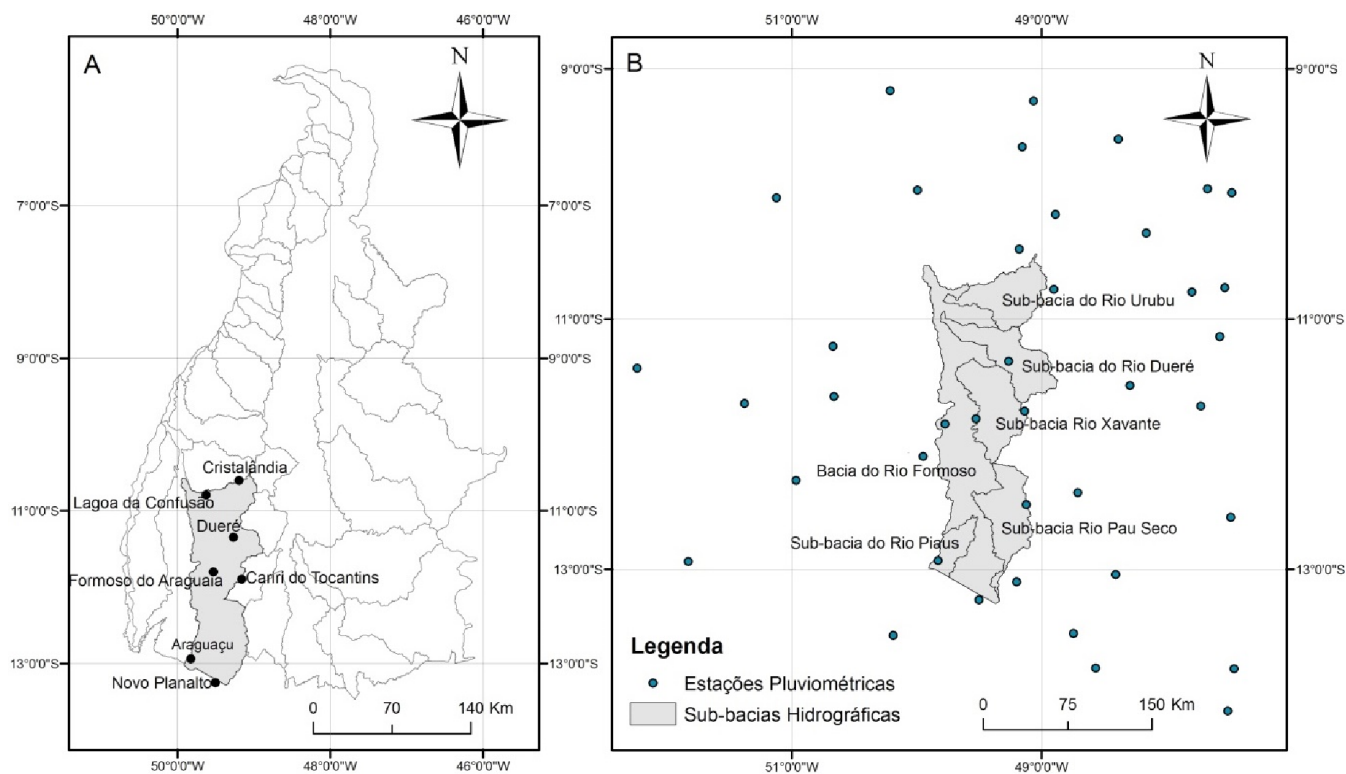


Figura 1. (A) Localização da Bacia Hidrográfica do rio Formoso com destaque para as sedes municipais inseridas na bacia e (B) sub-bacias da divisão hidrográfica do estado do Tocantins e postos pluviométricos utilizados no estudo (B)

Figueirópolis, Formoso do Araguaia, Gurupi, Lagoa da Confusão, Nova Rosalândia, Oliveira de Fátima, Pium, Sandolândia, Santa Rita do Tocantins e Talismã e b) Estado de Goiás: Porangatu, Novo Planalto e São Miguel do Araguaia. Destaca-se que deste total, sete tem sede municipal inserida na bacia (Tocantins, 2007).

A bacia do rio Formoso está situada no contato Cerrado-Floresta Estacional, na Amazônia Legal. Das fisionomias do Cerrado encontradas na bacia, a maioria delas é de formação campestre entremeadas por arvoretas, sendo somente a porção noroeste da bacia de formação florestal representada pela Savana Arbóreo Densa (Tocantins, 2007). Levantamento realizado pela Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins (Tocantins, 2012) mostra que o uso do solo predominante está associado com a atividade agropecuária, que prevalece em 43,51% da bacia, enquanto que 2,11% é destinado ao cultivo de culturas temporárias. A cobertura vegetal remanescente é caracterizada por fitofisionomias do Cerrado (41,9%) e por Mata Ciliar ou Mata de Galeria (11,29%), sendo a área restante atribuída a outros usos de menor abrangência, como Praias e Área Urbanizada (Tocantins, 2012).

Os solos predominantes na bacia do rio Formoso são os solos concrecionários, latossolo vermelho-amarelo, plintossolo, gleissolo, argissolo vermelho-amarelo, neossolo quartzarênico e neossolo litólico (Tocantins, 2007). Estes, em sua maioria, são mal

drenados, apresentam resistência a mecanização, elevada acidez e baixa fertilidade. De acordo com a classificação climática de Thornthwaite, a bacia do rio Formoso apresenta clima úmido com deficiência hídrica variando de moderada à nula, e regime de chuvas bem definido, apresentando um período seco e outro úmido (Tocantins, 2007). A precipitação média anual fica em torno de 1586,23 mm e a temperatura média varia entre 25,5 e 26 °C (Tocantins, 2009).

O banco de dados consiste de séries históricas de registros diários de chuvas, do período de 1985 a 2009, para 40 estações pluviométricas. Os dados foram obtidos junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo cinco postos pluviométricos localizados dentro dos limites da bacia e 35 nos arredores da bacia do rio Formoso. A utilização de séries hidrológicas das proximidades da bacia visa melhorar o mapeamento na região de contorno, e também, para a adequada representação da estrutura de dependência espacial da variável. A partir das séries históricas completas foram tabuladas séries de totais quinzenais. Na Figura 1B está apresentada a distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas.

Precipitação provável

Para a estimativa da precipitação provável aplicou-se a distribuição de probabilidades Log-Normal 2

parâmetros. Sua função densidade de probabilidades (FDP) é dada por:

$$FDP = \frac{1}{x \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \left(\frac{\ln(x) - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2} \quad (1)$$

em que, σ_n e μ_n são os parâmetros da distribuição e x é a variável hidrológica em estudo.

A equação geral proposta por Chow (1964), para a distribuição Log-Normal está apresentada na Equação 2:

$$x_{TR} = e^{\mu_n + k_{TR} \cdot \sigma_n} \quad (2)$$

em que x_{TR} representa a variável hidrológica associada à probabilidade de ocorrência TR e k_{TR} é o fator associado à probabilidade.

Com o intuito de verificar a adequação da distribuição para cada evento em análise, aplicou-se o teste Kolmogorov-Smirnov a um nível de 5% de significância. Este teste tem sido muitas vezes empregado para verificação do ajuste de distribuições de probabilidades em séries históricas de precipitação provável (Catalunha et al., 2002; Baú et al., 2006; Longo et al., 2006; Oliveira et al., 2010; Soccol et al., 2010). O teste consiste da comparação do erro máximo de ajuste, com um valor tabelado em função do tamanho da amostra (n) e de um nível de significância (α). O valor tabelado é estatisticamente nulo e neste sentido, valores calculados iguais ou menores a ele, serão também estatisticamente nulos e, portanto, a distribuição de probabilidades será adequada (Ávila, 2006).

Análise geoestatística

A análise geoestatística foi precedida da análise exploratória dos dados, com o objetivo de verificar a adequabilidade dos mesmos às técnicas geoestatísticas. Desta forma, geraram-se gráficos de tendências e histogramas de distribuição de frequência para todos os eventos estudados, com o objetivo de checar a não tendenciosidade do conjunto de dados e verificar a sua normalidade, atestando assim, a aplicabilidade das técnicas geoestatísticas.

Uma etapa fundamental da análise geoestatística consiste no ajuste de modelos de semivariograma teóricos ao semivariograma experimental, obtendo-se os parâmetros que estruturam tais modelos (efeito pepita, contribuição e alcance). Os modelos ajustados foram o exponencial, esférico e gaussiano, tendo sido aplicado o método de ajuste dos mínimos quadrados ponderados (MQP). De acordo com Mello et al. (2005), o MQP é uma tentativa de ponderar a semivariância, uma vez

que a ponderação pela variância das estimativas das semivariâncias não é conhecida, o que é obtido quando se divide o erro quadrático médio pelo número de pares de pontos em cada distância no semivariograma.

A fim de verificar a qualidade do ajuste dos modelos de semivariograma aplicou-se a técnica da validação cruzada. De acordo com Santos et al. (2011) esta técnica consiste em estimar os valores da variável em estudo para a exata localização dos pontos amostrados, permitindo quantificar o erro médio percentual absoluto (EMPA). O modelo que produziu o menor valor de EMPA para cada análise foi selecionado para o mapeamento por krigagem ordinária. Procedimento análogo foi adotado em diversos estudos de mesma natureza, com destaque para o trabalho desenvolvido por Mello et al. (2005). O EMPA, em %, foi calculado utilizando a seguinte expressão:

$$EMPA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Obs_i - Est_i)}{Obs_i} \right| \cdot 100 \quad (3)$$

em que, n é o número de postos pluviométricos, Obs_i é a precipitação observada para o posto i e Est_i é a precipitação estimada por krigagem para a posição do posto i.

Visando checar o grau de estruturação dos modelos de semivariograma ajustados foi calculado o grau de dependência espacial (GD), sendo dado conforme Cambardella et al. (1994) por:

$$GD = \left[\frac{C_1}{(C_0 + C_1)} \right] \cdot 100 \quad (4)$$

em que, C_1 é a contribuição e C_0 o efeito pepita.

Pela aplicação da krigagem ordinária foram gerados mapas de superfície da precipitação provável quinzenal para os meses do período chuvoso (outubro a abril), com 75% de probabilidade de excedência ($P_{p75\%}$) e 90% de probabilidade de excedência ($P_{p90\%}$), e extraídos os valores médios de lâmina para a bacia do rio Formoso para cada evento em análise. Em todas as etapas da análise geoestatística foi utilizado o pacote GeoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001), e a Projeção Cônica de Albers (Campos et al., 2008).

Resultados e Discussão

Análise exploratória

Pelo teste de adequação estatística de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 5%, verificou-se que dos 1120 ajustes da distribuição de probabilidades

Log-Normal, ou seja, 40 séries históricas divididas em 14 períodos quinzenais (7 meses de estação chuvosa) e em dois níveis de probabilidade (75 e 90%), apenas 12 não se adequaram. Este resultado vem a confirmar o emprego desta distribuição no estudo da precipitação provável, em consonância com os resultados obtidos por Mello et al. (1994), Longo et al. (2006), Junqueira Júnior et al. (2007) e Ávila et al. (2009).

Na Figura 2, apresentam-se gráficos de tendência e o histograma de frequência para os dados de precipitação provável da primeira quinzena do mês de novembro, com 75% de probabilidade de excedência, que representam o comportamento geral dos resultados da análise exploratória, em termos de tendência e normalidade.

No contexto da distribuição espacial dos dados, pela análise dos gráficos de tendência, observa-se dispersão nas direções leste-oeste (longitude) e norte-sul (latitude). De acordo com Ávila et al. (2009), a boa dispersão observada para o conjunto de dados significa que os semivariogramas ajustados terão boa condição para representação da continuidade espacial, sendo esta característica de suma importância para aplicação da geoestatística. Pela análise do histograma de frequência, constatou-se que os eventos analisados apresentaram normalidade. Assim, por intermédio da análise exploratória, foi possível constatar não tendenciosidade espacial, ou seja, os dados se distribuem aleatoriamente no espaço, o que de acordo com Gomes et al. (2007), atende às pressuposições requeridas para o interpolador geoestatístico.

Aplicação de técnicas geoestatísticas

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os parâmetros dos modelos de semivariograma, o erro médio percentual absoluto e o grau de dependência espacial para os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano ajustados às séries de precipitação provável quinzenal

para a bacia hidrográfica do rio Formoso com 75 e 90% de probabilidade de excedência, respectivamente.

Com base no EMPA constatou-se que houve melhor ajuste do modelo de semivariograma esférico em 50% dos eventos analisados, enquanto os modelos exponencial e gaussiano sobressaíram em 28,57% e 21,43%, respectivamente. Carvalho & Assad (2005), em seu trabalho sobre a precipitação média anual de 1.027 postos pluviométricos do Estado de São Paulo, também observaram que o semivariograma esférico foi o que melhor se ajustou aos dados.

Segundo Viola et al. (2010), o alcance da variabilidade espacial está associado com a distância máxima entre estações meteorológicas a fim de que se obtenha estrutura de dependência espacial entre os dados, e assim uma boa qualidade no mapeamento da variável. Para o presente estudo o alcance variou entre 35 e 404 km, aproximadamente. Os menores valores de alcance foram observados entre a primeira quinzena de novembro e a primeira quinzena de janeiro, para ambos os níveis de probabilidade. Isto está relacionado com a elevada variabilidade espacial das precipitações convectivas, que predominam na região norte do Brasil, mostrando maior variabilidade no período de maior concentração das chuvas.

Em relação ao grau de dependência espacial (GD), nota-se que 60,71% dos ajustes apresentaram grau de dependência espacial $\geq 75\%$, caracterizando uma forte estrutura de dependência espacial, enquanto 32,14% apresentaram GD entre 25 e 75%, caracterizando grau de dependência espacial moderado, e apenas 7,14% dos ajustes apresentaram GD $\leq 25\%$, caracterizando grau de dependência espacial fraco, de acordo com classificação proposta por Robertson (1998). De acordo com Vieira (2000), resultados desta qualidade revelam que o uso do interpolador geoestatístico (krigagem) produzirá resultados não-enviesados e com variância mínima.

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se os modelos de semivariograma ajustados aos dados de precipitação

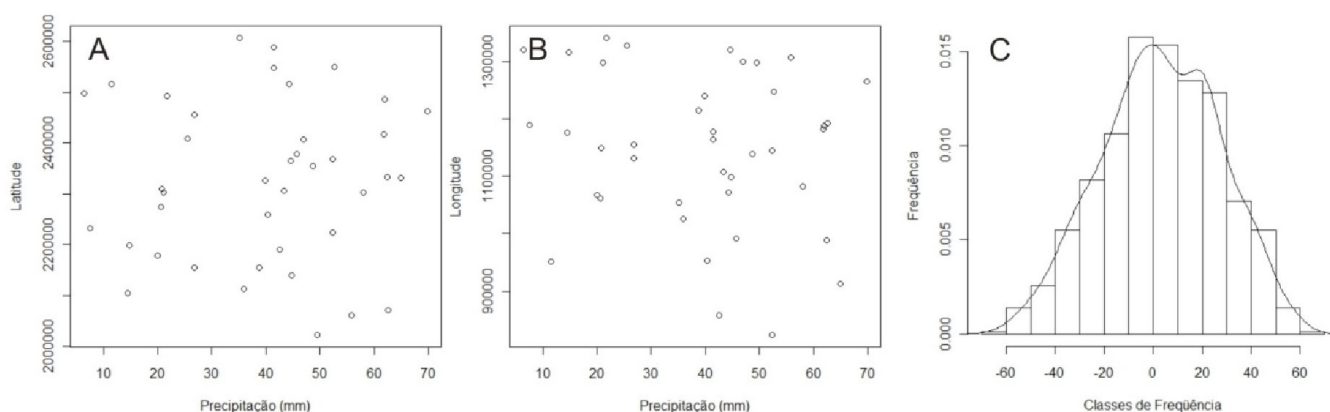


Figura 2. Gráficos de tendência nas direções norte-sul (A) e leste-oeste (B), e histograma de distribuição de frequências entre pares de pontos (C), relativos a precipitação provável da 1ª quinzena do mês de novembro, com 75% de probabilidade de excedência

Tabela 1. Parâmetros dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano (efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e alcance (A)), erro médio percentual absoluto (EMPA) obtido por validação cruzada, e grau de dependência espacial (GD), para a precipitação provável com 75% de probabilidade de excedência

Período	Modelo	GD (%)	C_0	C_1	A (Km)	EMPA (%)
1ª Quinzena Outubro	Exponencial	69,51	21,51	49,04	210,54	89,9
	Esférico	60,08	25,22	37,95	399,39	88,8
	Gaussiano	50,01	31,52	31,53	196,88	90,0
2ª Quinzena Outubro	Exponencial	57,46	147,15	198,74	403,63	65,4
	Esférico	83,92	38,37	200,29	61,15	70,7
	Gaussiano	47,59	125,27	113,75	43,81	71,3
1ª Quinzena Novembro	Exponencial	34,79	200,42	106,94	51,30	67,2
	Esférico	89,59	31,55	271,56	40,00	65,0
	Gaussiano	16,36	257,13	50,31	101,18	67,1
2ª Quinzena Novembro	Exponencial	100	0	380,33	26,92	48,8
	Esférico	89,35	40,03	335,96	40,00	51,8
	Gaussiano	100	0	379,35	39,73	46,4
1ª Quinzena Dezembro	Exponencial	100	0	444,28	26,58	37,2
	Esférico	89,14	47,47	389,80	40,00	35,7
	Gaussiano	80,13	88,48	356,92	47,08	39,1
2ª Quinzena Dezembro	Exponencial	51,57	470,06	500,57	44,50	59,1
	Esférico	66,67	318,82	637,64	40,00	56,5
	Gaussiano	21,64	760,03	209,84	89,50	58,0
1ª Quinzena Janeiro	Exponencial	100	0	560,42	43,43	41,0
	Esférico	88,75	61,38	484,32	40,00	37,0
	Gaussiano	100	0	556,47	58,57	43,7
2ª Quinzena Janeiro	Exponencial	45,39	164,88	137,04	30,66	39,0
	Esférico	100	0	300,12	56,35	38,1
	Gaussiano	17,67	248,54	53,36	66,55	39,2
1ª Quinzena Fevereiro	Exponencial	100	0	691,57	55,74	45,6
	Esférico	88,31	77,17	582,87	40,00	44,7
	Gaussiano	100	0	676,45	62,46	46,8
2ª Quinzena Fevereiro	Exponencial	100	0	335,93	18,62	45,5
	Esférico	89,49	35,12	299,02	40,00	44,4
	Gaussiano	100	0	335,65	29,36	47,1
1ª Quinzena Março	Exponencial	50,65	311,27	319,52	80,84	59,6
	Esférico	88,61	66,48	517,14	40,00	63,2
	Gaussiano	33,40	408,71	204,99	103,47	59,9
2ª Quinzena Março	Exponencial	35,05	483,92	261,17	72,53	52,7
	Esférico	66,67	237,58	475,17	40,00	53,1
	Gaussiano	26,32	543,46	194,15	96,93	52,2
1ª Quinzena Abril	Exponencial	100	0	363,12	64,83	61,8
	Esférico	89,49	35,09	298,84	40,00	79,4
	Gaussiano	85,52	50,89	300,66	76,47	65,4
2ª Quinzena Abril	Exponencial	23,70	46,33	14,39	210,48	96,4
	Esférico	90,33	5,40	50,43	40,00	111,5
	Gaussiano	15,53	49,73	9,14	214,78	95,2

provável com 75% e 90% de probabilidade de excedência, respectivamente. Os ajustes podem ser observados visualmente em função do comportamento dos modelos ajustados aos pontos dos semivariogramas experimentais. Observa-se, na maioria dos casos, melhor adequação do modelo esférico, o que reforça as avaliações e resultados

produzidos pela validação cruzada. Para a $P_{p90\%}$ da segunda quinzena de abril, não foi possível ajustar os modelos de semivariograma exponencial e gaussiano, tendo sido observado, efeito pepita puro. Contudo, observa-se bom ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais, o que, segundo Santos et al. (2011), mostra que podem ser

Tabela 2. Parâmetros dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano (efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e alcance (A)), erro médio percentual absoluto (EMPA) obtido por validação cruzada, e grau de dependência espacial (GD), para a precipitação provável com 90% de probabilidade de excedência

Período	Modelo	GD (%)	C_0	C_1	A (Km)	EMPA (%)
1ª Quinzena Outubro	Exponencial	56,15	11,73	15,02	193,94	191,2
	Esférico	90,45	2,02	19,14	40,00	245,2
	Gaussiano	37,41	15,19	9,08	184,50	193,2
2ª Quinzena Outubro	Exponencial	58,10	78,42	108,73	306,09	130,4
	Esférico	99,97	0,04	137,40	58,64	138,5
	Gaussiano	55,72	61,04	76,81	44,61	138,4
1ª Quinzena Novembro	Exponencial	22,03	157,40	44,48	49,59	143,7
	Esférico	89,91	20,20	180,04	40,00	138,1
	Gaussiano	10,38	180,96	20,96	97,97	144,1
2ª Quinzena Novembro	Exponencial	100	0	258,76	24,72	105,4
	Esférico	89,74	26,36	230,53	40,00	111,9
	Gaussiano	59,49	104,66	153,71	44,10	103,5
1ª Quinzena Dezembro	Exponencial	100	0	288,82	25,09	68,2
	Esférico	89,65	29,49	255,41	40,00	66,1
	Gaussiano	99,18	2,37	286,81	40,62	71,4
2ª Quinzena Dezembro	Exponencial	61,39	262,10	416,76	34,73	125,9
	Esférico	88,26	78,97	593,56	40,00	121,8
	Gaussiano	18,97	550,88	128,99	85,34	123,7
1ª Quinzena Janeiro	Exponencial	100	0	408,38	22,93	75,9
	Esférico	89,25	43,64	362,36	40,00	73,5
	Gaussiano	100	0	408,74	40,08	80,6
2ª Quinzena Janeiro	Exponencial	100	0	204,69	34,77	68,9
	Esférico	89,91	20,21	180,06	40,00	74,8
	Gaussiano	46,85	108,46	95,60	65,30	70,5
1ª Quinzena Fevereiro	Exponencial	100	0	512,04	54,55	85,8
	Esférico	88,96	54,08	435,70	40,00	86,0
	Gaussiano	100	0	501,40	61,57	83,8
2ª Quinzena Fevereiro	Exponencial	100	0	254,85	33,03	90,5
	Esférico	89,75	25,78	225,80	40,00	84,2
	Gaussiano	82,98	43,28	210,96	52,11	94,0
1ª Quinzena Março	Exponencial	43,98	247,94	194,67	81,07	125,3
	Esférico	89,20	45,31	374,41	40,00	133,4
	Gaussiano	30,55	301,68	132,68	101,82	126,0
2ª Quinzena Março	Exponencial	100	0	526,67	26,20	97,6
	Esférico	88,84	58,42	464,84	40,00	96,2
	Gaussiano	19,87	422,69	104,80	75,87	95,7
1ª Quinzena Abril	Exponencial	100	0	219,00	50,76	121,2
	Esférico	89,89	21,04	186,98	40,00	153,2
	Gaussiano	74,48	55,27	161,33	73,43	122,0
2ª Quinzena Abril	Exponencial	EPP*	-	-	-	-
	Esférico	90,45	1,79	16,96	40,00	208,1
	Gaussiano	EPP*	-	-	-	-

*EPP: Efeito Pepita Puro.

obtidos resultados satisfatórios no mapeamento dos dados pelas técnicas geoestatísticas.

Mapeamento da precipitação provável quinzenal

Nas Figuras 5 e 6 estão apresentados os mapas de precipitação provável quinzenal, em mm, para o período

chuvoso na bacia hidrográfica do rio Formoso, com 75 e 90% de probabilidade de excedência, respectivamente.

Pode-se observar que a precipitação provável quinzenal apresenta considerável variabilidade espacial e temporal. Em termos de sua variabilidade espacial, durante a época de maior rigor do período chuvoso,

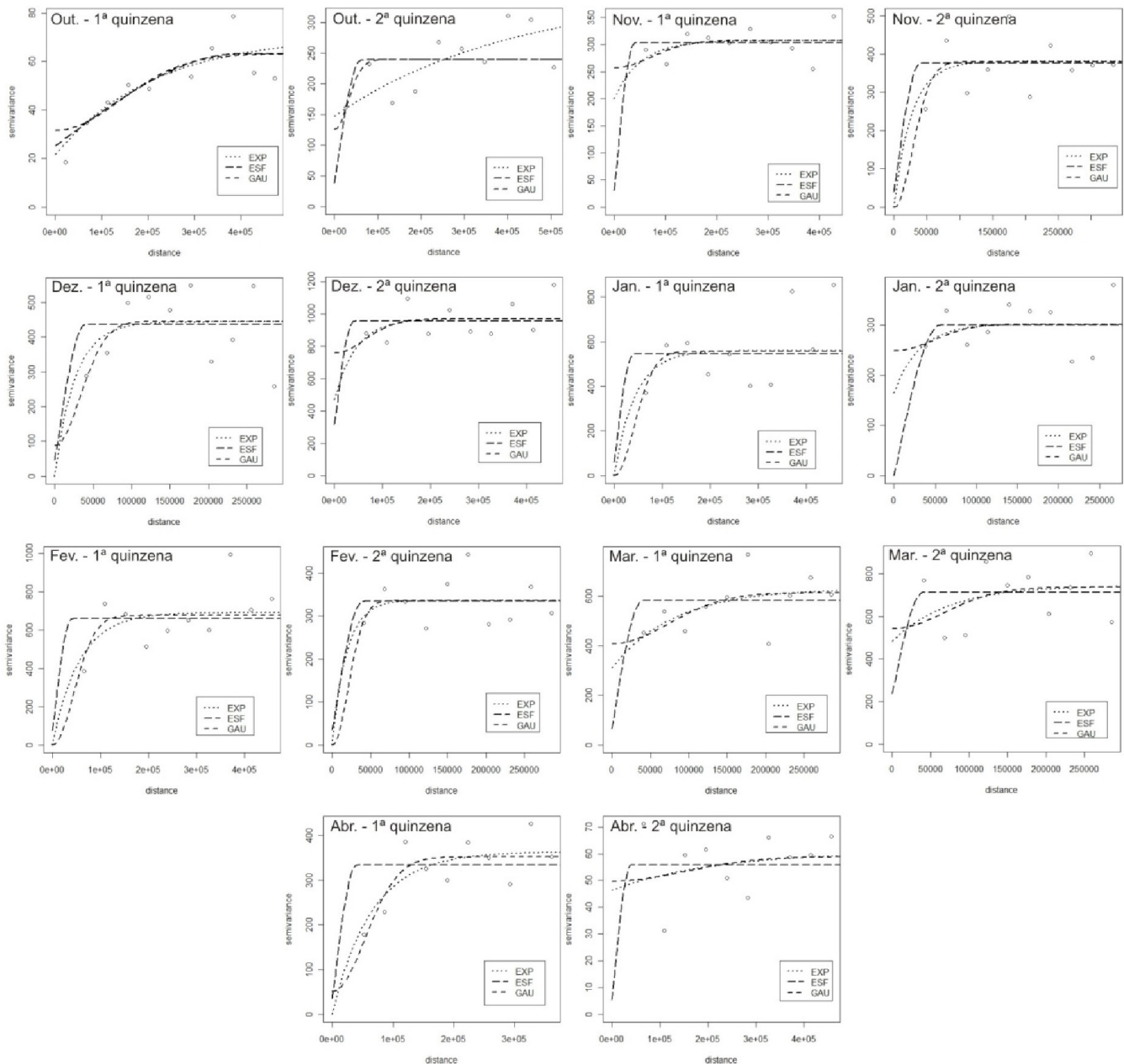


Figura 3. Semivariogramas ajustados aos dados de precipitação provável quinzenal ao nível de 75% de probabilidade de excedência

entre novembro e fevereiro, não fica nítido um padrão de variabilidade, sendo um período de lâminas prováveis mais homogêneas na bacia. Entretanto, nos meses de outubro, março e abril, a região norte da bacia destaca-se com as maiores lâminas prováveis. A variabilidade temporal por sua vez, é marcada pelo ápice do regime chuvoso na segunda quinzena de dezembro, na qual a média na bacia é de 82,09 mm ($P_{p75\%}$) e 55,59 mm ($P_{p90\%}$). A $P_{p75\%}$ representa a lâmina provável que pode-se esperar em 3 de cada 4 anos, enquanto que a $P_{p90\%}$ representa a lâmina esperada em 9 de cada 10 anos, sendo esta última indicada para situações de planejamento agrícola que demandem maior confiabilidade, como por exemplo, na estimativa da lâmina de irrigação suplementar para

dimensionamento de sistemas de irrigação para culturas de alta rentabilidade.

Analisando-se as lâminas prováveis para os meses que compõe o auge do período chuvoso na bacia do rio Formoso (dezembro, janeiro, fevereiro e março), observa-se que a média na bacia assume valores superiores a 50 mm e 29 mm para $P_{p75\%}$ e $P_{p90\%}$, respectivamente. Cabe mencionar para este período a ocorrência de algumas regiões com maiores lâminas prováveis na área de influência dos postos pluviométricos de Dueré e Fátima (noroeste), Araguaçu (sudoeste) e Alvorada (sudeste).

Outra importante abordagem sobre o regime pluvial, sobretudo em regiões de fronteira agrícola,

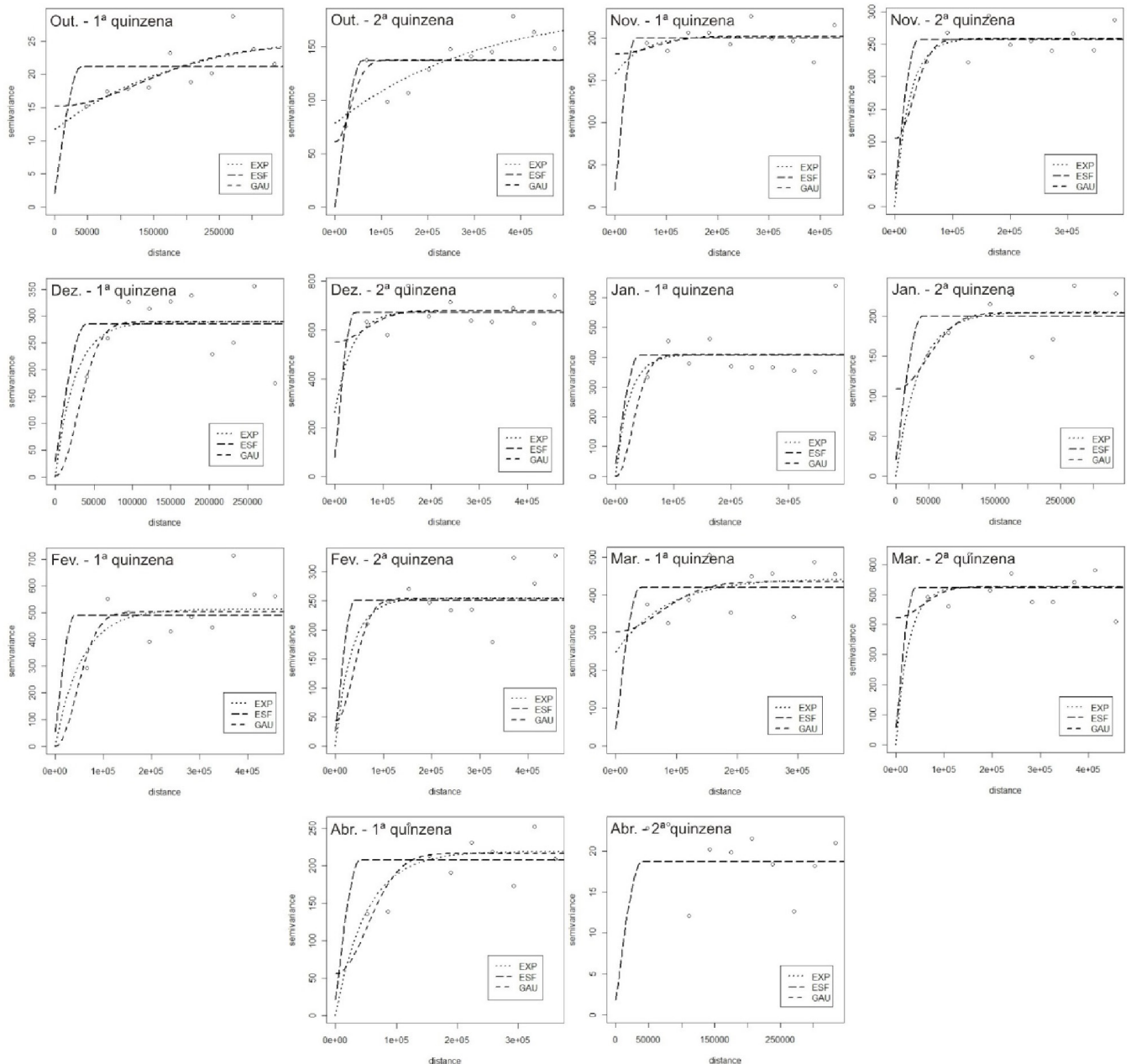


Figura 4. Semivariogramas ajustados aos dados de precipitação provável quinzenal ao nível de 90% de probabilidade de excedência

refere-se à precipitação provável ao início do período chuvoso, visando subsidiar o planejamento de atividades agrícolas tais como preparo do solo e plantio. Observa-se que na primeira quinzena de outubro a precipitação provável é reduzida, com valor médio na bacia hidrográfica de 10 mm ($P_{p75\%}$) e 4 mm ($P_{p90\%}$), sendo substancialmente incrementada na segunda quinzena, passando para 27 mm ($P_{p75\%}$) e 16 mm ($P_{p90\%}$). Entretanto, cabe ressaltar para o mês de outubro, que a disponibilidade hídrica no extremo norte da bacia é maior, atingindo lâminas prováveis superiores a 15 mm ($P_{p75\%}$) na primeira quinzena e a 30 mm ($P_{p75\%}$) para a segunda quinzena. Lâminas prováveis reduzidas podem ser esperadas também

para o fim do período chuvoso, indicando forte declínio do regime pluvial no mês de abril.

Resultados de mapeamento da precipitação provável obtidos por Uliana et al. (2013) para o estado do Espírito Santo, Danfá et al. (2011) para Guiné-Bissau, Ávila et al. (2009) para a região sul de Minas Gerais e Sampaio et al. (2007) para o Estado do Paraná, possibilitaram, de maneira análoga a este estudo, a verificação de importantes padrões espaciais e temporais de ocorrência da precipitação provável, tornando nítida a importância deste tipo de investigação para a gestão de recursos hídricos.

Na Figura 7 estão inseridos os resultados da relação entre a precipitação média quinzenal e a precipitação

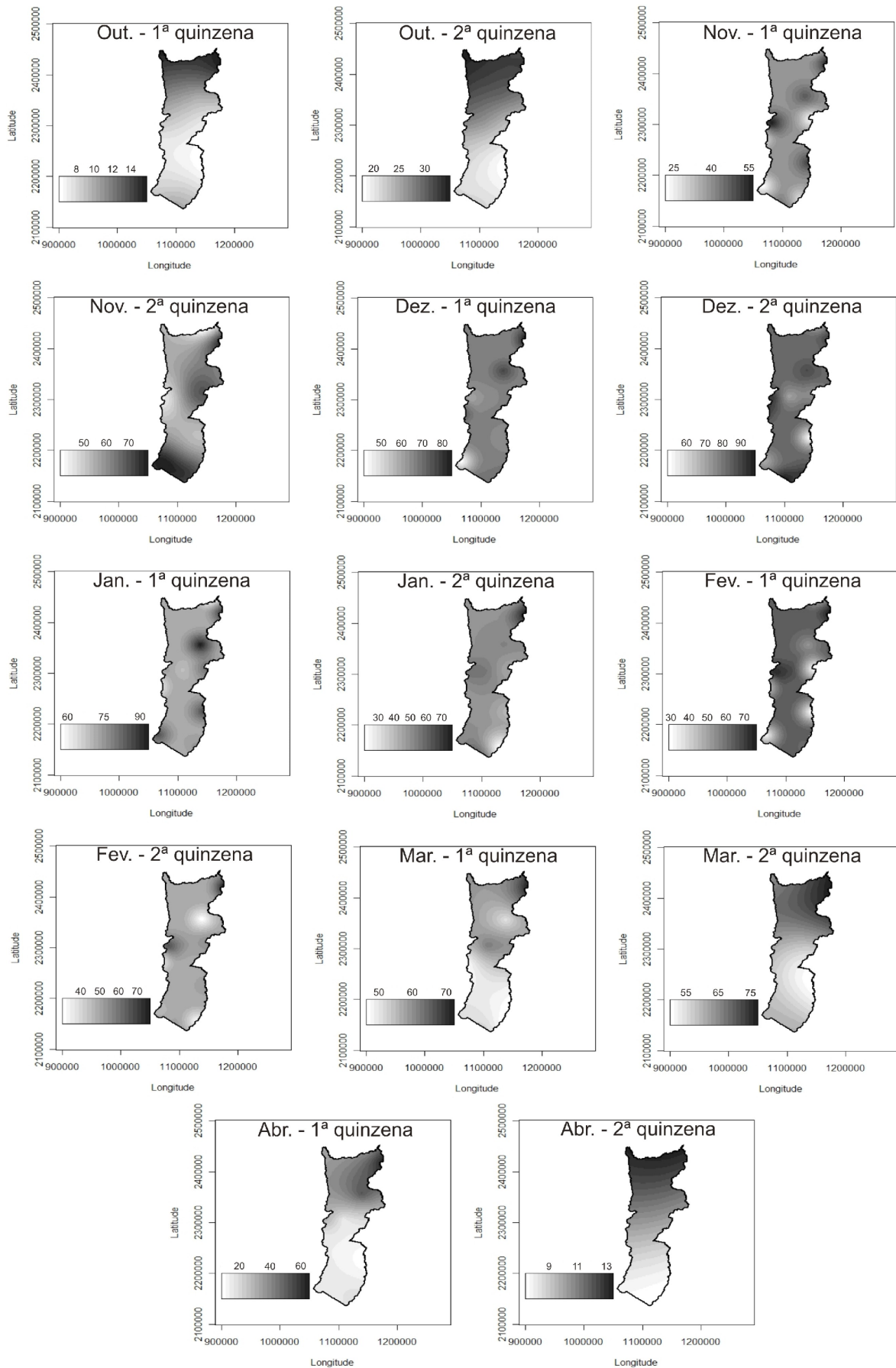


Figura 5. Precipitação provável quinzenal com 75% de probabilidade, em mm, para o período chuvoso na bacia hidrográfica do rio Formoso - TO

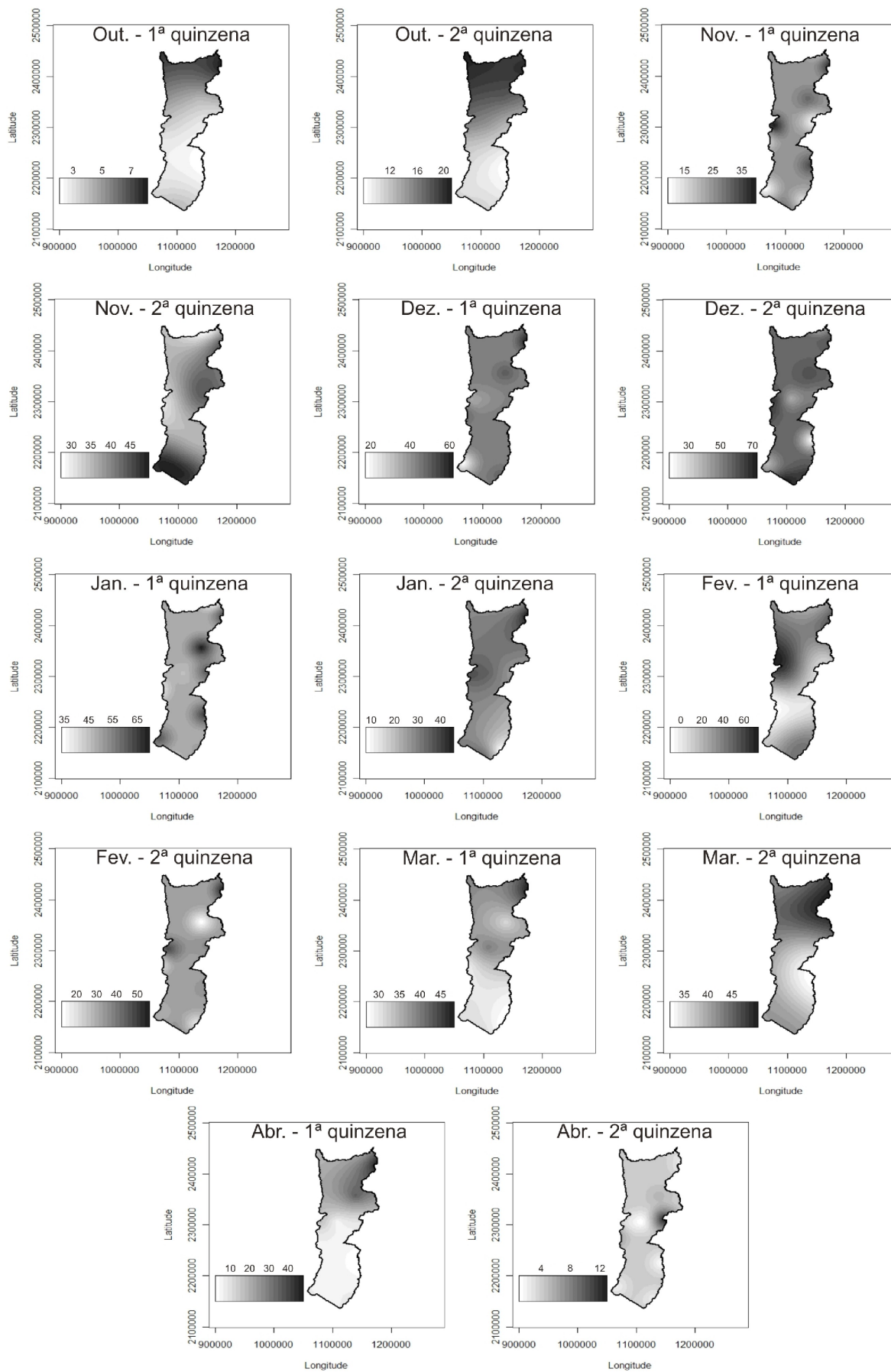


Figura 6. Precipitação provável quinzenal com 90% de probabilidade, em mm, para o período chuvoso na bacia hidrográfica do rio Formoso - TO

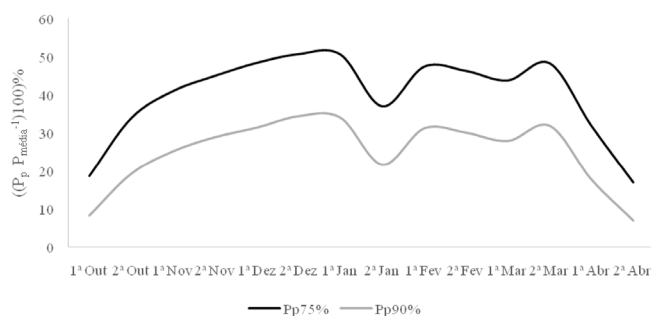


Figura 7. Relação entre a precipitação média quinzenal ($P_{m\acute{e}dia}$) e a precipitação provável com 75% de probabilidade de excedência ($P_{p75\%}$) e com 90% de excedência ($P_{p90\%}$)

provável quinzenal com 75% de probabilidade de excedência ($P_{p75\%}$) e com 90% de excedência ($P_{p90\%}$). Em termos médios, observa-se que para a bacia do rio Formoso, a $P_{p75\%}$ representa 40,1% da precipitação média quinzenal observada, enquanto que a $P_{p90\%}$ representa 25%. Tal redução das lâminas prováveis é decorrente do aumento da confiabilidade da estimativa (Ribeiro et al., 2007).

Os valores da relação $P_p P_{m\acute{e}dia}^{-1}$ acompanham o desenvolvimento do período chuvoso na bacia hidrográfica do rio Formoso. Seus menores valores ocorrem na primeira quinzena de outubro e segunda quinzena de abril, enquanto que, os maiores ocorrem no auge do período chuvoso, sobretudo na segunda quinzena de dezembro e primeira quinzena de janeiro. Observa-se na quinzena subsequente (2ª quinzena de janeiro) reduzido valor para a relação $P_p P_{m\acute{e}dia}^{-1}$, formando um "vale" nas curvas apresentadas na Figura 7. Isto está associado com a maior variabilidade observada para a lâmina precipitada nesta quinzena, o que pode ser explicado pela incidência de veranicos, como resultado da ação do Anticiclone do Atlântico Sul (Reboita et al., 2010). Nesta situação, a maior dispersão dos dados da série em relação à média, apresenta como consequência estimativas de precipitação provável mais restritivas pela distribuição de probabilidades.

O conhecimento desta relação possibilita a estimativa da precipitação provável a partir da precipitação média, que é facilmente obtida a partir de registros pluviométricos, conforme também relatado por Soccol et al. (2010) para o município de Lages-SC e Souza et al. (2013) para diversas localidades brasileiras. Neste sentido, a disponibilização de ferramentas deste tipo, sobretudo em regiões de fronteira agrícola, com escassez de informações ambientais, é essencial para o planejamento agrícola e para a gestão de recursos hídricos.

Conclusões

Notou-se, pelos resultados do teste de adequabilidade de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de

significância, que a distribuição de probabilidades Log-normal 2 parâmetros foi adequada em 98,9% dos eventos de precipitação provável quinzenal analisados.

O mapeamento da precipitação provável quinzenal na bacia hidrográfica do rio Formoso apresenta-se como uma importante ferramenta para o planejamento agrícola, fornecendo subsídios técnicos para o dimensionamento de sistemas de irrigação e demais atividades que demandem o conhecimento da precipitação provável. A lâmina provável quinzenal na bacia do rio Formoso durante o período chuvoso (outubro a abril) apresenta considerável variabilidade espacial e temporal, com a média na bacia variando de 4 a 56 mm ($P_{p90\%}$), e de 9 a 82 mm ($P_{p75\%}$). A $P_{p75\%}$ representa a lâmina provável que pode-se esperar em 3 de cada 4 anos, enquanto que a $P_{p90\%}$ representa a lâmina esperada em 9 de cada 10 anos. Desta maneira, espera-se no período crítico (1ª quinzena de outubro e 2ª quinzena de abril) que em um de cada quatro anos ocorra precipitação inferior a 9 mm ($P_{p75\%}$), e que em um de cada 10 anos ocorra lâmina inferior a 4 mm ($P_{p90\%}$). Os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, representam o auge do período chuvoso na bacia do rio Formoso, com seu ápice ocorrendo na segunda quinzena de dezembro, com lâminas prováveis de 82,09 mm ($P_{p75\%}$) e 55,59 mm ($P_{p90\%}$). Foi possível constatar elevada variabilidade da lâmina precipitada na 2ª quinzena de janeiro, indicando que neste período a ocorrência de veranicos é acentuada.

A região norte da bacia apresenta maiores lâminas prováveis nos meses de outubro, março e abril, ou seja, ao início e fim do período chuvoso, indicando que nesta área ocorre melhor distribuição espacial das chuvas, com importantes implicações sobre o déficit hídrico, e consequentemente para o planejamento da agricultura.

Em termos médios, verificou-se que para a bacia do rio Formoso, a $P_{p75\%}$ representa 40,1% da precipitação média observada, enquanto que a $P_{p90\%}$ representa 25%.

Literatura Citada

- Ávila, L. F. Precipitação provável na região sul de Minas Gerais. Lavras: UFLA. 2006. 79p. Monografia Graduação.
- Ávila, L. F.; Mello, C. R.; Viola, M. R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.906–915, 2009.
- Baú, A. L.; Gomes, B. M.; Queiroz, M. M. F.; Opazo, M. A. U.; Sampaio, S. C. Comportamento espacial da precipitação pluvial mensal provável da mesoregião oeste do Estado do Paraná. Irriga, v.11, p.150-168, 2006.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. Viçosa: Imprensa Universitária. 2006. 625p.

- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Novak, J. M.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- Campos, S. R. S.; Carvalho, L. M. T.; Scolforo, J. R.; Oliveira, A. D.; Martinhago, A. Z.; Veiga, R. D.; Lima, R. B. Banco de dados. In: Scolforo, J. R.; Carvalho, L. M. T.; Oliveira, A. D. (ed.). *Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais*. Lavras: UFLA. 2008. p.43-72.
- Carvalho, J. R. P.; Assad, E. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. *Engenharia Agrícola*, v.25, p.377-384, 2005.
- Catalunha, M. J.; Sediya, G. C.; Leal, B. G.; Soares, C. P. B.; Ribeiro, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, p.153-162, 2002.
- Chow, V. T. *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill Book. 1964. Paginação irregular.
- Danfá, S.; Silva, A. M.; Mello, C. R.; Coelho, G.; Viola, M. R.; Ávila, L. F. Distribuição espacial de valores prováveis de precipitação pluvial para períodos quinzenais, em Guiné-Bissau. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.67-74, 2011.
- Dourado Neto, D.; Assis, J. P.; Timm, L. C.; Manfron, P. A.; Sparovek, G.; Martin, T. N. Ajuste de modelos de distribuição de probabilidade a séries históricas de precipitação pluvial em Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.13, p.273-283, 2005.
- Gomes, N. M.; Silva, A. M.; Mello, C. R.; Faria, M. A.; Oliveira, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.435-443, 2007.
- Haan, C. T. *Statistical Methods in Hydrology*. Ames: The Iowa State University Press. 2002. 377p.
- Junqueira Júnior, J. A.; Gomes, N. M.; Mello, C. R.; Silva, A. M. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, Alto Rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, p. 842-850, 2007.
- Longo, A. J.; Sampaio, S. C.; Queiroz, M. M. F.; Sussek, M. Uso das distribuições gama e log-normal na estimativa de precipitação provável quinzenal. *Varia Scientia*, v.6, p.107-118, 2006.
- Mello, C. R.; Lima, J. M.; Silva, A. M.; Mello, J. M.; Oliveira, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.925-933, 2003.
- Mello, C. R.; Sá, M. A. C.; Curi, N.; Mello, J. M.; Viola, M. R.; Silva, A. M. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.4 p.537-545, 2007.
- Mello, C. R.; Viola, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.37-44, 2013.
- Mello, C. R.; Viola, M. R.; Curi, N.; Silva, A. M. Distribuição espacial da precipitação e da erosividade da chuva mensal e anual no Estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1878-1891, 2012.
- Mello, C. R.; Viola, M. R.; Mello, J. M.; Silva, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.32, p.532-539, 2008.
- Mello, J. M.; Batista, J. L. F.; Ribeiro Júnior, P. J.; Oliveira, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, n.69, p.25-37, 2005.
- Mello, M. H. A.; Arruda, H. V.; Ortolani, A. A. Probabilidade de ocorrência de totais pluviais máximos horários, em Campinas, São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, v.15, p. 59-67, 1994.
- Melo Júnior, J. C. F.; Sediya, G. C.; Ferreira, P. A.; Leal, B. G.; Minusi, R. B. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.417-425, 2006.
- Morais, A. R.; Botelho, V. A. V. A.; Carvalho, L. G.; Muniz, J. A.; Lage, G. Estimativa da precipitação provável em Lavras, MG, através da distribuição Gama. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, p.305-310, 2001.
- Oliveira, J. P. B.; Cecílio, R. A.; Xavier, A. C.; Jasper, A. P. S.; Oliveira, L. B. Precipitação Provável para Alegres através da distribuição de probabilidade gama. *Engenharia Ambiental*, v.7, p.204-211, 2010.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. da; Ambrizzi, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, p.185-204, 2010.
- Ribeiro Júnior, P. J.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. *R – News*, v.1, p.15-18, 2001.
- Ribeiro, B. T.; Avanzi, J. C.; Mello, C. R.; Lima, J. M.; Silva, M. L. N. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para a região de Barbacena, MG. *Ciência e agrotecnologia*, v. 31, p. 1297-1302, 2007.
- Robertson, G. P. *GS+: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User’s Guide*. Plainwell: Gamma Design Software. 1998. 152p.

- Sampaio, S. C.; Queiroz, M. M. F.; Frigo, E.; Longo, A. J.; Suszek, M. Estimativa e distribuição de precipitações decendiais para o Estado do Paraná. *Irriga*, v.12, p.38-53, 2007.
- Santos, E. H. M.; Griebeler, N. P.; Oliviera, L. F. C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite - GO. *Engenharia Agrícola*, v.31,p.78-89, 2011.
- Silva, J. C.; Heldwein, A. B.; Martins, F. B.; Trentin, G.; Grimm, E. L. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11,p.67-72, 2007.
- Socol, O. J.; Cardoso, C. O.; Miquelluti, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.569-574, 2010.
- Souza, J. L. M.; Jerszurki, D.; Damazio, E. C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, p.693-702, 2013.
- Tocantins. Secretaria de Recursos da Infra Estrutura. *Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do Tocantins:Relatório Síntese*. Palmas: SEINF. 2009. 251p.
- Tocantins. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. *Plano de bacia hidrográfica do rio Formoso – PBH rio Formoso, no Estado do Tocantins: Relatório Síntese*. Palmas: SRHMA. 2007. 70 p.
- Tocantins. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. *Base de Dados Geográficos do Tocantins. versão 2012*. Palmas: SEPLAN. 2012. Disponível em: <<http://www.seplan.to.gov.br/Portal/governo/geo/bases-vetoriais>>. Acesso em 11 abr. 2013.
- Uliana, E. M.; Reis, E. F.; Silva, J. G. F.; Xavier, A. C. Precipitação mensal e anual provável para o Estado do Espírito Santo. *Irriga*, v. 18, p. 139-147, 2013.
- Vergara, F. E.; Reis, F. C.; Magalhães Filho, L. N. L.; Rezende, C. S. A. Proposta de vazão de referência Q_{90} para o rio Formoso na bacia do Araguaia. *Engenharia Ambiental*, v.10, p.84-102, 2013.
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. H.; Schaefer, C. E. G. R. (org.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2000. p.1-54.
- Viola, M. R.; Mello, C. R.; Pinto, D. B. F.; Mello, J. M.; Ávila, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.970-978, 2010.