

MODELO ESTOCÁSTICO PARA SIMULAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DIÁRIA DE UMA REGIÃO¹

MARIO SILVA GENNEVILLE² e ARAÉ BOOCK³

RESUMO - Desenvolveu-se um modelo estocástico de precipitação diária, em linguagem FORTRAN, para a região de Cerrados do Brasil. O modelo foi construído usando-se basicamente duas variáveis: (1) a probabilidade de ocorrência de chuva em cada dia do mês, e (2) a probabilidade de ocorrência dessa chuva dentro de certa magnitude. Definiu-se a primeira variável por uma probabilidade de transição, que considera a série histórica de precipitação com base no processo de Markov, onde o sistema passa de um estado a outro, em ensaios sucessivos, considerando o que sucedeu no estado anterior. A segunda variável foi gerada consecutivamente para cada "dia chuvoso", conforme as probabilidades mensais reais de ocorrência nas classes. Fizeram-se três diferentes simulações para se avaliar o modelo, e os resultados foram comparados aos dados históricos. As médias simuladas de precipitação anual foram maiores que as da série histórica, sendo os desvios de apenas 0,9 a 3,6%. As médias mensais e seus desvios-padrão (DP) também estiveram relativamente próximos das médias da série histórica, embora os DP das simulações de dezembro tenham sido subestimados. Outras variáveis usadas para avaliar o ajuste das simulações foram: (1) número médio de dias de chuva por mês (2) frequência mensal de precipitações segundo a magnitude, (3) frequência mensal de dias consecutivos de chuva, e (4) frequência mensal de dias consecutivos sem chuva. Todas as comparações mostraram bom ajuste aos dados reais.

Termos para indexação: cadeias de Markov, linguagem FORTRAN, cerrado, Brasil.

STOCHASTIC SIMULATION MODEL OF DAILY PRECIPITATION FOR A REGION

ABSTRACT - A stochastic simulation model of daily precipitation was developed in FORTRAN computer language for the Brazilian Cerrado Region. The model was built using basically two variables: (1) the probability of rain in any one day of each month, and (2) the probability of occurrence of that rainfall within a certain magnitude. The first variable was defined by a transition probability which takes into account the historical series of precipitation, based on the Markov process, where the system jumps from one state to another, in successive assays, considering what happened in the latest state. The second variable, the precipitation magnitude, was also consecutively generated for each "rainy day", according to the probabilities of real occurrence frequencies of such monthly rainfall classes. Three different simulation runs were made in order to evaluate the model and their results compared with the historical data. Simulated annual rainfall means were above the values of the historical series but deviations ranged from only 0.9 to 3.6%. Monthly means and their standard deviations (SD) were also reasonably close to the historical means, the December SD of simulations being underestimated. Other variables used to evaluate the fitness of the simulations were: (1) mean number of rainy days per month, (2) monthly frequency of precipitation according to the magnitude, (3) monthly frequency of continuously rainy days, (4) monthly frequency of continuously rainless days. All comparisons showed a good agreement with real data.

Index terms: Markov chains, FORTRAN computer language, Cerrado, Brazil.

INTRODUÇÃO

A produção de carne é um sistema complexo, sujeito a influências de fatores econômicos, sociais e climáticos que implicam em certo nível de incertezas. Dentre os fatores climáticos, a temperatura, a radiação solar e as chuvas desempenham um papel importante no nível e na variação da produção

que alcançam as pastagens. A chuva, no entanto, é o fator que possivelmente provoca as maiores variações de produção dentro e entre anos, para uma grande variedade de situações no Brasil. Assim sendo, faz-se necessário estudar sua influência frente às diferentes estratégias de uso do sistema.

A principal dificuldade para realizar esses tipos de estudos é que as séries históricas de precipitações pluviométricas disponíveis são, em sua maioria, pequenas para efetua-los, e, à medida que elas sejam mais reduzidas, maiores serão as possibilidades de se obterem resultados tendenciosos para a região. Faz-se necessário dispor de uma técnica

¹ Aceito para publicação em 4 de agosto de 1983.

² Eng.^o-Agr.^o, M.Sc., Assessor do IICA, Contrato IICA/EMBRAPA, 1979-1980, e Especialista da FAO, Projeto BRA 75/023, 1978-1979, CNPQC.

³ Eng.^o-Agr.^o, M.Sc., EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (CNPQC), Caixa Postal 154, CEP 79100 - Campo Grande, MS.

que permita amenizar este problema para estudar o efeito da chuva no sistema de produção.

Uma forma de se obter solução é gerando, estocasticamente, a chuva diária, a qual, conectada a modelos conceituais de balanço hídrico, produção primária, secundária e aspectos econômicos e sociais, permita estudar a reação do sistema a mudanças em seus componentes na presença da influência deste fator.

Através do uso dessa técnica também é possível avaliar resultados de experimentos que não podem ser estudados por um grande número de anos, como, por exemplo, resultados obtidos de jardins de introdução de espécies forrageiras, de experimentos destinados a estimar a resposta das plantas a fertilizantes etc.

Por essas razões, realizou-se este trabalho, cujo objetivo específico foi simular a precipitação diária em uma região determinada.

A fim de se mostrar o desempenho do modelo, apresenta-se aqui a simulação feita para uma região de Cerrados, considerando a série histórica de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, entre os anos de 1934 a 1978.⁴

DESCRIÇÃO DO MODELO

Funcionamento geral

O modelo, ao gerar estocasticamente a chuva diária, toma em conta doze períodos que se identificam com cada um dos meses do ano e considera dois aspectos básicos para gerar aquela variável: (1) a probabilidade de ocorrência de uma chuva em um dia qualquer de cada mês e (2) a probabilidade de chover com uma certa magnitude desde que a condição (1) seja satisfeita. Como consequência do desempenho destas duas probabilidades, pode ocorrer, ou não, uma chuva (DLL) em um dia dado. A Fig. 1 mostra a estrutura deste modelo de acordo com a simbologia proposta por Forrester (1976).

Probabilidade de ocorrência de chuva

O trabalho assume que o sistema pode encontrar-se em um dos estados possíveis: o de ocorrên-

cia de chuva, definido por $PROB = 1$, ou o de não-ocorrência de chuva, definido por $PROB = 0$. Para determinar o estado presente, o modelo usa somente o evento ocorrido no dia anterior. Este procedimento permite usar a matriz de probabilidade de transição de uma cadeia markoviana definida como:

LLU00	LLU01
LLU10	LLU11

onde LLU00 é a probabilidade de que não ocorra chuva em dois dias sucessivos, LLU01 é a probabilidade de que chova hoje se não houve chuva no dia anterior, LLU10 é a probabilidade de que não chova hoje se houve chuva no dia anterior e, finalmente, LLU11 representa a probabilidade de chuva em dois dias consecutivos. As duas primeiras e as duas últimas são complementares. O modelo compara LLU01 ou LLU11, conforme seja o estado de onde provenha o sistema, com o valor aleatório gerado no computador por uma distribuição uniforme RANDU I.⁵ A chuva ocorre, $PROB = 1$, cada vez que o número gerado por RANDU I foi inferior a tais probabilidades.

Magnitude da chuva (DLL)

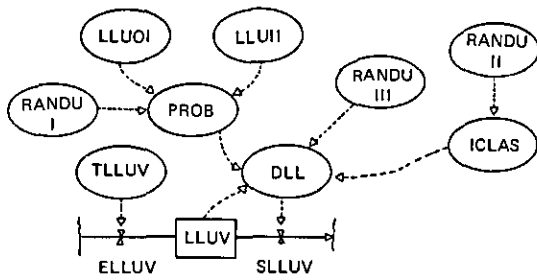
Quando $PROB = 1$, gera-se a chuva correspondente. Neste caso, utiliza-se uma distribuição empírica que relaciona a magnitude da chuva com sua probabilidade de ocorrência em tal magnitude. Esta distribuição foi calculada a partir da informação obtida com o programa que sintetiza os dados da série histórica (PROCHUV) com relação à frequência com que ocorrem diferentes magnitudes de chuva em cada mês do ano.

Colocou-se esta distribuição empírica de probabilidades em uma função (ICLAS) que seleciona a classe de precipitação conforme um valor aleatório da distribuição uniforme (RANDU II). O algoritmo é o seguinte:

$$ICLAS = J \text{ se } TAB(J - 1, \text{MÉS}) < RANDU II < \\ < TAB(J, \text{MÉS}),$$

⁴ Dados gentilmente cedidos pelo Serviço Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro.

⁵ Os algarismos romanos indicam que o modelo usa seqüências independentes de números aleatórios gerados de acordo com a subrotina RANDU.



- DLL - Precipitação diária
- ICLAS - Função empírica que relaciona a probabilidade com a ocorrência de uma chuva de magnitude determinada
- LLUOI - Probabilidade que ocorra uma chuva quando o dia anterior foi seco
- LLUII - Probabilidade que ocorra uma chuva quando o dia anterior foi chuvoso
- RANDU - Subrotina FORTRAN para gerar uma distribuição uniforme de números aleatórios entre 0 e 1. Os algoritmos romanos indicam que o modelo usa distintas seqüências de números aleatórios em cada fase da simulação
- LLUV - Variável de estado que indica em cada dia do mês a quantidade de chuva que potencialmente ainda pode cair
- ELLUV - Taxa de entrada de LLUV
- SLLUV - Taxa de saída de LLUV que desconta a quantidade de água que cai em cada DLL
- TLLUV - Quantidade máxima de chuva que pode cair em cada mês segundo a série histórica
- PROB - Probabilidade de ocorrência de uma chuva

FIG. 1. Diagrama de fluxo do modelo estocástico de simulação da precipitação pluviométrica de uma região.

onde TAB corresponde à matriz que armazena as freqüências relativas acumuladas de quantidade de chuva por mês. Uma vez obtida a classe de magnitude de chuva, elege-se, com novo valor aleatório de distribuição uniforme (RANDU III), o valor da chuva dentro da classe previamente selecionada. A eleição do tipo de chuva dentro de cada classe é dada por: $DLL = (IC + YFH * 5) * PROB$, onde IC é o limite superior da classe selecionada de acordo com a distribuição empírica, YFH é o valor aleatório da distribuição uniforme (RANDU III), e o valor "5" é a amplitude das classes em milímetros de chuva.

Quantidade máxima de chuva que pode ocorrer em um mês

A quantidade de chuva que pode cair em cada mês está limitada pelo máximo de chuva observado na série histórica (TLLUV), valor que se acumula no nível (LLUV) através da taxa ELLUV. Cada

dia que ocorrer uma chuva (DLL), o valor de LLUV é comparado a esta; se a quantidade armazenada em LLUV é igual ou maior que DLL, chove a quantidade estipulada em DLL e imediatamente LLUV se reduz deste valor por meio da taxa ELLUV. Quando DLL é maior que LLUV, chove somente o remanescente no nível e daí em diante não volta a chover neste mês.

Os valores mensais e anuais de precipitação são obtidos acumulando-se os valores diários e mensais de chuva, respectivamente.

Linguagem e intervalo de programação

O modelo foi programado em linguagem FORTRAN e simula o comportamento do sistema dia a dia.

AVALIAÇÃO DO MODELO

Com o objetivo de se avaliar o modelo, fizeram-se três simulações distintas, e os resultados foram comparados com a série histórica através das seguintes variáveis:

1. Média anual de precipitação
2. Média mensal de precipitação
3. Desvio-padrão das médias mensais de precipitação
4. Número médio de dias com chuva em cada mês
5. Freqüência mensal de precipitação segundo a magnitude
6. Freqüência mensal de dias consecutivos de chuva
7. Freqüência mensal de dias consecutivos sem chuva.

As variáveis 2, 3 e 4 são apresentadas para todos os meses e as variáveis 5, 6 e 7 se referem apenas aos meses de maior e menor precipitação (janeiro e agosto) e aos de precipitação intermediária (abril e outubro).

Os totais médios anuais de precipitação simulados alcançaram valores superiores aos da série histórica, ainda que desviassem desta apenas entre 0,9 e 3,6%. As médias anuais e seus desvios-padrão também estiveram razoavelmente próximos dos da série histórica. O único mês no qual se observou uma subestimação apreciável do desvio padrão nas três simulações foi dezembro. No entanto, o erro que a isto se associa não deve ser considerável, da-

da a grande quantidade de água que cai neste mês (Tabelas 1 e 2). Na Tabela 3, pela comparação do número de dias com chuva nas três simulações com a série histórica, também se pode apreciar o grau de representatividade do modelo. Os valores do coeficiente de determinação (r^2), do coeficiente angular (b) e da interceptação da curva com a origem (a) das regressões lineares de cada simulação com a série histórica são apresentados na Tabela 4.

As Fig. 2 a 4 mostram o desempenho das demais variáveis que quantificam as características das chuvas simuladas com respeito às da série histórica.

Os resultados apresentados mostram que as simulações imitam razoavelmente a realidade. Este comportamento é, em parte, próprio de modelos baseados em probabilidades.

APLICAÇÃO DO MODELO

As comparações dos dados obtidos pelo modelo de simulação com os da série histórica foram feitas através de diversas variáveis que indicam o padrão de precipitação através do tempo. Todas elas são

TABELA 1. Médias mensais e anuais de precipitação pluviométrica de três simulações e da série histórica, para um período de 45 anos, na região de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Meses	Série histórica (mm)	Simulações		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
Jan.	232,6	233,8	237,9	235,9
Fev.	184,1	201,0	182,0	181,4
Mar.	150,2	132,6	154,0	148,9
Abr.	113,5	120,4	125,9	114,3
Mai	84,3	73,5	90,0	89,0
Jun.	46,9	60,5	47,3	44,3
Jul.	39,5	44,7	46,4	30,4
Ago.	30,1	33,5	28,8	35,7
Set.	68,4	64,7	77,8	60,2
Out.	151,1	141,2	141,7	159,3
Nov.	170,3	184,1	188,2	173,2
Dez.	207,3	212,8	214,5	218,2
Total anual	1.478,1	1.502,8	1.534,5	1.490,8
Desvio (%)		+ 1,6	+ 3,6	+ 0,9

importantes, já que, em conjunto, dão uma idéia clara do rigor climático referente à precipitação pluviométrica. Se não se considerasse qualquer uma dessas variáveis, ao se conectar esse modelo ao

TABELA 2. Desvios-padrão das médias mensais de precipitação pluviométrica das três simulações e da série histórica, para um período de 45 anos, na região de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Meses	Série histórica (mm)	Simulações		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
Jan.	89,5	100,6	85,9	88,1
Fev.	71,8	85,2	69,3	51,8
Mar.	67,6	56,3	56,4	53,1
Abr.	63,1	67,1	68,7	60,3
Mai	60,0	56,8	57,5	59,3
Jun.	46,2	48,6	39,8	32,5
Jul.	45,2	37,1	39,8	31,2
Ago.	33,9	29,3	26,8	29,6
Set.	51,1	40,5	43,1	38,8
Out.	77,1	66,2	69,4	63,9
Nov.	83,0	85,9	86,1	72,8
Dez.	115,4	91,6	67,3	75,7

TABELA 3. Número de dias em que chove mensal e anualmente, segundo a série histórica e três simulações, para um período de 45 anos, na região de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Meses	Série histórica (mm)	Simulações		
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
Jan.	17	17	18	18
Fev.	16	17	16	17
Mar.	15	14	15	14
Abr.	9	9	9	9
Mai	7	6	7	7
Jun.	5	5	4	5
Jul.	4	4	4	3
Ago.	3	3	3	4
Set.	6	6	7	6
Out.	11	11	11	11
Nov.	12	13	12	13
Dez.	16	16	16	16
Total anual	121	121	122	123

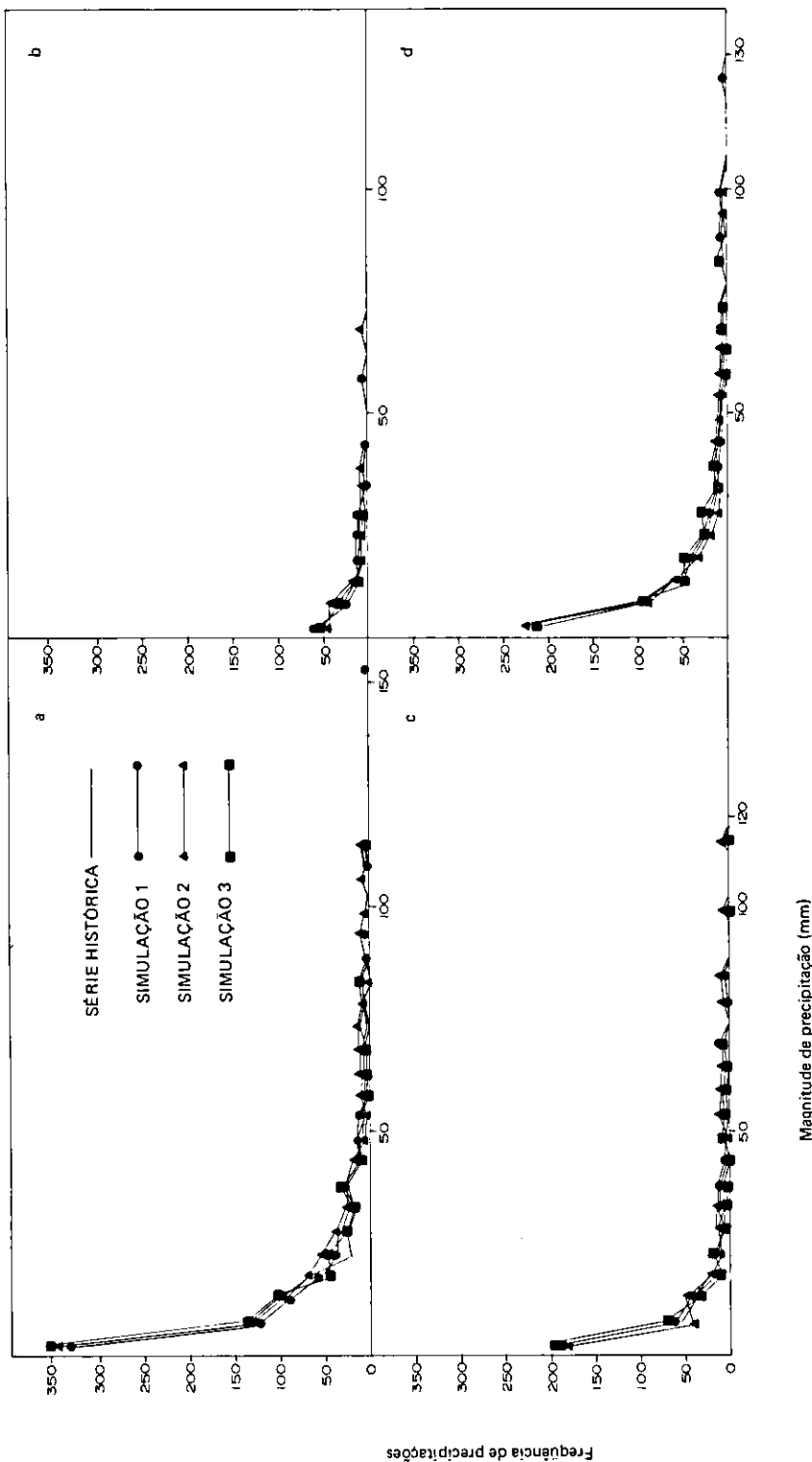


FIG. 2. Frequências de precipitações pluviométricas segundo sua magnitude. Total de um período de 45 anos da série histórica e de três simulações: (a) mês mais úmido do ano (janeiro), (b) mês mais seco do ano (agosto), e (c & d) meses de precipitação intermediária (abril e outubro, respectivamente).

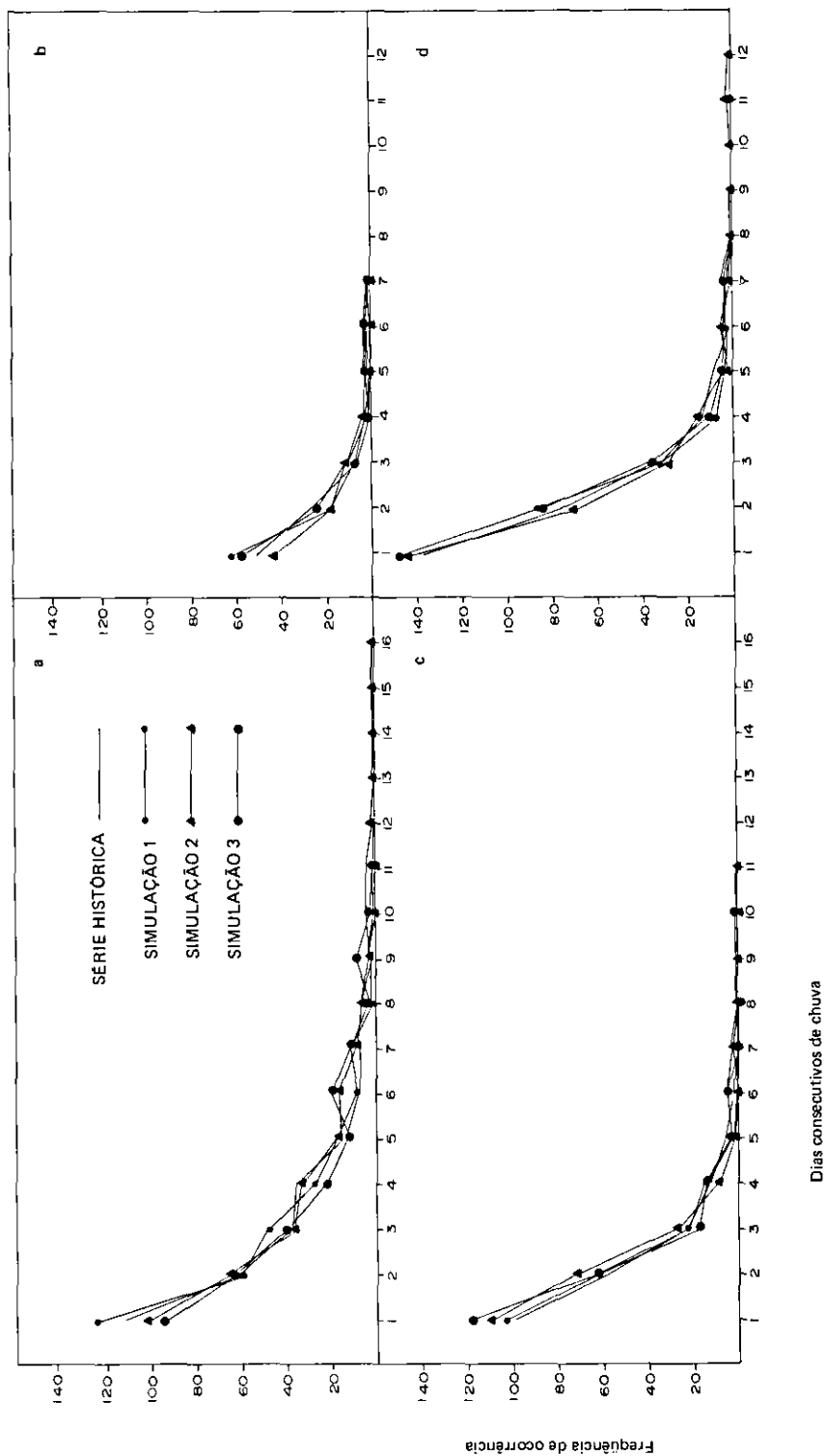


FIG. 3. Frequências de ocorrência de dias consecutivos com chuva. Total de um período de 45 anos da série histórica e de três simulações: (a) mês mais úmido do ano (janeiro), (b) mês mais seco do ano (agosto), e (c & d) meses de precipitação intermediária (abril e outubro, respectivamente).

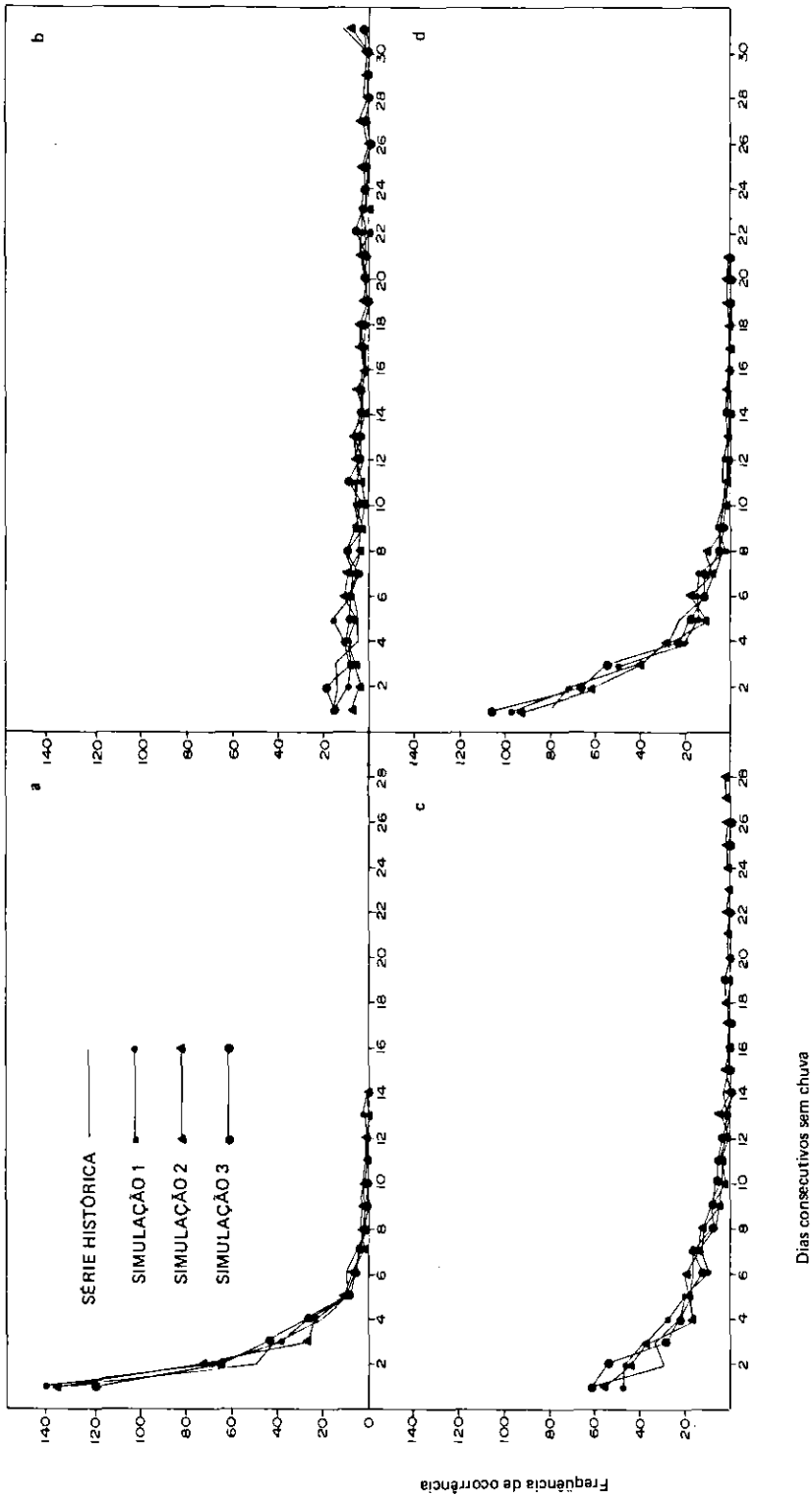


FIG. 4. Frequências de ocorrência de dias consecutivos sem chuva. Total de um período de 45 anos da série histórica e de três simulações: (a) mês mais úmido do ano (janeiro), (b) mês mais seco do ano (agosto), e (c & d) meses de precipitação intermediária (abril e outubro, respectivamente).

TABELA 4. Coeficiente de determinação (r^2), ordenada na origem (a), e coeficiente angular (b) das regressões lineares entre os valores médios mensais, desvios-padrão e número de dias com chuva, da série histórica e das três simulações realizadas.

Simulações	Série histórica		
	r^2	a	b
Médias mensais de chuvas			
1	97,4	1,537	0,971
2	98,8	2,394	0,981
3	94,4	4,482	0,956
Desvios-padrão das chuvas mensais			
1	77,6	11,650	0,868
2	60,2	10,390	0,957
3	75,7	9,580	1,045
Número de dias mensais com chuvas			
1	98,6	0,333	0,967
2	99,0	0,277	0,965
3	98,1	0,312	0,953

de balanço hídrico, este último poderia sofrer alterações que repercutiriam na produção das pastagens, simulada através de modelos mecanísticos.

A finalidade deste modelo é simular chuvas de acordo com as características gerais do clima, para que se possa estudar o efeito de diversas estratégias bioeconômicas no sistema de produção de carne de uma região. Teoricamente, para se usar este modelo seria aconselhável substituir as probabilidades

empíricas de magnitude da chuva em cada mês por uma função contínua obtida a partir de uma série histórica. Isto poderia chegar a ser importante já que a série histórica na qual se baseia o cálculo destas probabilidades representa uma amostra do processo geral de chuvas (Phillips 1971). Por esta via poder-se-iam eliminar grandes variações de caráter aleatório das frequências observadas. Assim, neste estudo, ao se observar a Fig. 2, pode-se perceber que, se se fizesse essa correção, não ocorreriam mudanças substanciais, motivo pelo qual não se postulou realizá-la. É evidente que para esse nível de precisão, caso se trabalhasse com séries históricas cada vez menores, esta correção teria cada vez mais importância. Por outro lado, à medida que o montante da precipitação pluviométrica fosse menor, necessitar-se-iam séries históricas cada vez mais longas para não ser preciso fazer a correção. É possível que, em muitos casos, ela deva ser feita, para se evitar vícios de uma amostra pouco representativa.

Como a chuva apresenta periodicidade, outro aspecto que seria desejável considerar é o uso de séries históricas de precipitação pluviométrica que abranjam, à medida do possível, um intervalo de tempo que compreenda ciclos completos (séries históricas de precipitações anuais recorrentes).

REFERÊNCIAS

- FORRESTER, J.W. Principles of systems. Cambridge, With-Allen Press, 1976. 1v.
- PHILLIPS, J.B. Statistical methods in systems analysis. In: DENT, J.B. & ANDERSON, J.R. Systems analysis in agricultural management. North Ryde, John Wiley & Sons, 1971. 394p.