

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Tiago Almeida Rocha

**MODELAGEM MULTIVARIADA CHUVA-VAZÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ – PB**

Campina Grande, Março de 2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO

**MODELAGEM MULTIVARIADA CHUVA-VAZÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ – PB**

Tiago Almeida Rocha

**CAMPINA GRANDE - PB
Março de 2020**

Tiago Almeida Rocha

**MODELAGEM MULTIVARIADA CHUVA-VAZÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ – PB**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

Área: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Orientador: Francisco de Assis Salviano de Sousa

CAMPINA GRANDE - PB
Março de 2020

R672m Rocha, Tiago Almeida.
Modelagem multivariada chuva-vazão na Bacia
Hidrográfica do Rio Piancó – PB / Tiago Almeida Rocha. –
Campina Grande, 2020.
68 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de
Sousa".

Referências.

1. Hidrologia. 2. Modelos. 3. Vazão. I. Sousa, Francisco de
Assis Salviano de. II. Título.

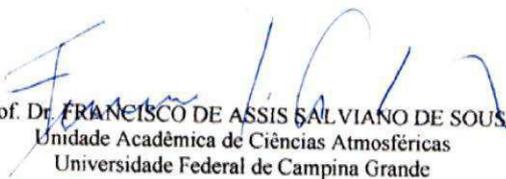
CDU 556(043)

TIAGO ALMEIDA ROCHA

MODELAGEM MULTIVARIADA CHUVA-VAZÃO NA SUB-BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ - PB

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/03/2020

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. PAULO DA COSTA MEDEIROS
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
Universidade Federal de Campina Grande

DEDICATÓRIA

Ao meu grandioso Deus, meus pais, Josefa e Vamberto, e a minha irmã, Juliana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por ter permitido chegar até aqui, foi minha força em momentos de extrema dificuldade, tudo devo a Ele.

A minha família que me apoiou nessa jornada, em especial a minha mãe e pai, minha irmã. os quais foram fundamentais na minha formação.

Aos meus amigos mais íntimos, Kelly, Guga, Raysa, Mery, os quais sempre estiveram ao meu lado. Em especial ao meu amigo Ulisses que conheci no período de mestrado e se tornou como um irmão para mim, e sempre incentivando a continuar, nunca desistir.

Ao meu orientador Francisco de Assis Salviano de Sousa, por todo aprendizado, paciência, sempre prestativo e atencioso para se chegar ao fim desse trabalho.

Aos meus colegas Izana, André, Mercio que fizeram parte desse período de aprendizado, os quais sou grato pela ajuda, principalmente a de Mariana que contribuiu muito para a conclusão desse trabalho.

Agradeço a todos que compõe ao Departamento de Meteorologia, em especial aos professores por todo ensino e apoio na minha formação acadêmica.

Sumário

1. Introdução	13
1.1 Objetivo Geral	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2 Revisão Bibliográfica	16
2.1 Ciclo hidrológico	16
2.1.1 Precipitação pluvial	18
2.1.2 Escoamento superficial	18
2.1.3 Evaporação	19
2.1.4 Transporte de umidade na atmosfera	20
2.1.5 Modelos hidrológicos	21
2.2 Classificação dos modelos de simulação chuva-vazão	25
2.2.1 Modelos Estocástico e Determinístico	25
2.2.2 Modelos Conceitual e Empírico	26
2.2.3 Modelos Concentrado e Distribuído	26
2.2.4 Modelos Estacionário e Dinâmico	27
2.2.6 Modelo IPH II	28
2.2.7 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	29
2.3 Sistemas atuantes no Nordeste brasileiro e na bacia hidrográfica em estudo	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Região de estudo	33
3.1 Dados	36
3.4 Modelo de Regressão Linear Múltipla	38
3.3 Critérios para entrada/saída de variáveis independentes do modelo chuva-vazão	40
3.5 Avaliação do modelo	41
3.6 Calibração e Validação do Modelo	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5 CONCLUSÃO	61
BIBLIOGRAFIA	62
APÊNDICE A	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico. Fonte: Ministério do Meio Ambiente.	17
Figura 2: Representação esquemática. (Fonte : Tucci,2005)	24
Figura 3: Aspectos de classificação dos modelos hidrológicos. (Fonte: Marinho Filho, 2012). ..	25
Figura 4: Classificação dos modelos hidrológicos. (Fonte: Rocha, 2017)	28
Figura 5: Bacia hidrográfica do rio Piancó – PB.	35
Figura 6: Postos pluviométricos da bacia do rio Piancó – PB.	37
Figura 7: Método “forward stepwise” para seleção de entrada/saída de variáveis independentes no modelo.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição de água no Brasil.....	30
Tabela 2: Municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Piancó – PB e respectivas coordenadas geográficas.	30
Tabela 3: Postos que foram selecionados da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB e respectivas coordenadas geográficas, e siglas adotadas.	38
Tabela 4: Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe e porcentagem de viés.....	42
Tabela 5: Valores do R ² ajustado gerado pelo modelo.....	49
Tabela 6: Valores dos R ² ajustados à medida que se adicionou postos pluviométricos com dados padronizados até o ano de 2003.....	50
Tabela 7: Valores dos coeficientes de regressão do modelo com todos os postos pluviométricos.	51
Tabela 8: Valores das vazões simulada e observada padronizada com todos os postos.	51
Tabela 9: Valores dos índices calculados para o modelo proposto.	52
Tabela 10: Valores dos coeficientes, gerado pelo modelo com os postos I,G,B,A.	52
Tabela 11: Valores dos índices calculados para os postos pluviométricos I, G, B, A.	53
Tabela 12: Valores das vazões padronizadas simulada e observada com os postos I,G,B,A.	53
Tabela 13: valores dos R ² ajustado no modelo não linear aplicado o ln, a medida que ia adicionando postos.	55
Tabela 14: Valores das vazões simulada e observada aplicando Ln em todos os dados dos postos pluviométricos.....	56
Tabela 15: Valores das vazões simulada e observada com base na combinação de postos pluviométricos D, I, B, E, C, A e aplicando o Ln aos dados.....	57
Tabela 16: Valores dos R ² ajustados ao modelo não linear e aplicando o log aos dados pluviométricos.....	58
Tabela 17: Valores das vazões simulada e observada aplicando o Log à todos os postos pluviométricos.....	59
Tabela 18: Valores das vazões simulada e observada aplicando o Log aos postos pluviométricos da combinação D, E, A, F, B, C.	60

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de gerar séries sintéticas de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do rio Piancó, com base nos dados de total mensal precipitado de nove postos pluviométricos localizados no âmbito da bacia. O modelo utilizado foi uma equação de regressão linear e não linear que relacionou os dados de vazão aos dados de chuva. O Método “forward stepwise” foi usado para selecionar a entrada e saída das variáveis no modelo chuva-vazão. A principal conclusão deste estudo é que o ajuste do modelo proposto não foi satisfatório para o período estudado. Varias tentativas de melhoramento dos dados, ou metodologias aplicadas não obteve sucesso para a validação do modelo. Portanto é necessário novos estudos, novas abordagens, tais como os modelos como Redes Neurais Artificiais ou Regressão por Análise de Componentes Principais.

ABSTRACT

The objective of this work was to generate synthetic series of average monthly flows in the hydrographic basin of the Piencó River, based on the data of monthly precipitated total of nine pluviometric stations located within the basin. The model used was a linear and non-linear regression equation that related the flow data to the rain data. The “forward stepwise” method was used to select the input and output of variables in the rain-flow model. The main conclusion of this study is that the adjustment of the proposed model was not satisfactory for the period studied. Several attempts to improve the data, or applied methodologies, have not been successful for the validation of the model. Therefore, new studies, new approaches, such as models such as Artificial Neural Networks or Regression by Principal Component Analysis are needed

1. Introdução

Nos últimos anos, o aumento da população vem acarretando uma demanda maior na produção de alimentos e energia, impulsionando um crescimento exponencial da atividade industrial, que na sua grande maioria tem como elemento base a água, aumentando expressivamente as demandas dos recursos hídricos. O atendimento a essas demandas constitui atualmente um dos maiores desafios frente a necessidade do uso racional dos recursos naturais.

Agravando a situação, os mecanismos climáticos que produzem as precipitações no Semiárido são complexos, principalmente quando aliados a fatores como orografia da região, sistemas atmosféricos de meso e grande escalas e a proximidade do mar, resultam forte variabilidade espaço-temporal das precipitações que podem gerar eventos extremos como grandes cheias ou secas devastadoras. Felizmente, hoje já existe a possibilidade de se prever, com alguma antecedência, as probabilidades de ocorrência de eventos extremos e os períodos em que provavelmente ocorrerão. Essas informações podem ser usadas para minimizar os efeitos negativos desses eventos. (SOUSA, 2008).

O planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos e especialmente na região semiárida brasileira (SAB) apresentam sérias dificuldades devido à baixa disponibilidade de água. Nas cidades de maior porte, as demandas por água estão aumentando e urge supri-las a fim de garantir a segurança hídrica, o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região semiárida. Também, nessa região a falta ou escassez de séries temporais históricas de vazão é um dos entraves para a tarefa de planejar e gerenciar os recursos hídricos. (ROCHA, 2017)

O aprimoramento de técnicas de melhoramento na captação e aproveitamento da água é de extrema e fundamental importância para o SAB, que convive frequentemente com a seca. O estudo e as consequentes políticas públicas são meios para aliviar os infortúnios causados pelo fenômeno da estiagem. São o planejamento e a gestão dos recursos hídricos que fatalmente poderão minimizar os impactos econômico, social e ambiental na vida das pessoas mais carentes que residem no Semiárido brasileiro (SAB).

A compreensão sobre os processos hidrológicos é fundamental em estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas. O tempo

em que a água permanece nas diversas partes da hidrosfera influencia, entre outros, a disponibilidade hídrica, a ocorrência de inundações e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes. A importância dessas interrelações é responsável pelo crescente interesse em estudos hidrológicos; nesse contexto, a modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para obtenção de conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e para a previsão de cenários (MORAES, 2003).

A previsão de vazão num sistema hídrico é uma das técnicas utilizadas para minimizar o impacto das incertezas do clima sobre o gerenciamento dos recursos hídricos, podendo considerá-la um dos principais desafios relacionados ao conhecimento integrado da climatologia e hidrologia. A utilização de vazões previstas para otimização de operação de reservatórios é sugerida por muitos autores (Hamlet et al., 2002; Barros et al., 2003), alguns entendem que o uso é preferível, embora com algum erro, a fazer o controle de reservatório sem previsões (Labadie, 2004).

Devido aos diversos componentes envolvidos que se interrelaciona e afetam o comportamento hidrológico de uma bacia, é um grande desafio desenvolver estimativas acuradas de vazão. As informações antecipadas das vazões de rios contribuem principalmente para o planejamento operacional de usinas hidrelétricas e de atividades agrícolas, auxiliando na tomada de decisão, que visa minimizar os efeitos de cheias excepcionais e de escassez hídrica (COLLISCHONN et al., 2005).

A forma mais utilizada para se estudar fenômenos como a seca e/ou cheia é através de modelos hidrológicos, haja vista que o modelo faz uma representação de bacias hidrográficas, simulam vários cenários hipotéticos para que o estudioso possa analisar de forma mais abrangente tais eventos, incluindo vários fatores externos que possam de alguma forma influenciar esses eventos, como solo, localização, cobertura vegetal, dentre outros fatores. Porém nos últimos anos a modelagem dos recursos hídricos vem dando crescente importância aos problemas ambientais. Tem sido propostos modelos mais versáteis que utilizam princípios físicos e são capazes de representar os processos hidrológicos com variabilidade espacial e temporal (Marinho Filho, 2012). A utilização de modelos hidrológicos tem sido bastante difundida e suas aplicações na representação do comportamento de bacias hidrográficas têm apresentado resultados animadores, tanto na simulação e previsão de cenários hipotéticos para avaliação de impactos, bem como uma ferramenta na elaboração de projetos hidrológicos ou hidráulicos.

1.1 Objetivo Geral

Modelar vazões médias mensais na bacia hidrográfica do rio a partir de dados mensais de chuva.

1.2 Objetivos Específicos

- 1.2.1 – Análise de homogeneidade dos dados observados;
- 1.2.2 – Preenchimento de falhas dos dados observados;
- 1.2.3 – Estatísticas descritivas das amostras de dados;
- 1.2.4 – Identificação e espacialização dos postos pluviométricos;
- 1.2.5 – Estimativas dos parâmetros do modelo;
- 1.2.6 – Verificação e validação do modelo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ciclo hidrológico

Desde que a vida surgiu na Terra, há pouco mais de 3,5 bilhões de anos, a água foi fundamental como base da alimentação dos organismos e como meio de desenvolvimento de plantas e animais. A água é tão bem aproveitada que, ao longo de milhões de anos, o mesmo estoque original alimenta rios, lagos e aquíferos ou reservatórios subterrâneos no ciclo hidrológico. A água é a substância mais reciclável da natureza e faz parte essencial de todas as formas de vida dos reinos vegetal e animal, encontrando-se por toda a parte na crosta terrestre e atmosfera (SOUSA, 2008).

Cerca de 71% da superfície da Terra é coberta por água em estado líquido. Do total desse volume, 97,4% aproximadamente, está nos oceanos, em estado líquido. Porém a água dos oceanos é salgada, contém muito cloreto de sódio, além de outros sais minerais. A água que contém menos concentração de sais, conhecida como “água doce”, representa 2,6 % do total da água do planeta. Tal líquido se encontra em rios, lagos e nas represas, infiltrada nos espaços do solo e das rochas, nas nuvens e nos seres vivos. Cerca de 1,8% da água doce do planeta é encontrada em estado sólido, formando grandes massas de gelo nas regiões próximas dos pólos e no topo de montanhas muito elevadas. As águas subterrâneas correspondem a 0,96% desse aporte, o restante está disponível em rios e lagos.

Numa ótica geral, a quantidade de água no planeta sempre foi a mesma, fatores preocupantes são os aumentos das demandas e mau uso dos recursos hídricos, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) 2007, no último século, a disponibilidade de água por ser humano diminuiu 60%, enquanto que a população aumentou em 50%. Já que a população aumenta é necessário que se tenha novas tecnologias e estudos para minimizar os impactos negativos que tal crescimento venha a causar.

Além da quantidade de água doce disponível ser pouca ela é bastante mal distribuída devido a questão geográfica, onde países possuem grande quantidade do recurso, como é o caso do Brasil que possuem cerca de 5,661 bilhões de metros cúbicos e outro com tão pouco, como Kuwait com 10 metros cúbicos. A distribuição no Brasil não é tão favorável mesmo com a imensa quantidade. A região que mais possui água é a menos habitada que é a região Norte. Já a região Sudeste, a mais habitada, apresenta a menor proporção, como pode ser visto na Tabela 1

Tabela 1: Distribuição de água no Brasil.

Região	Densidade demográfica (hab/km ²)	Concentração dos recursos hídricos do país
Norte	4,12	68,5%
Nordeste	34,15	3,3%
Centro- oeste	8,75	15,7%
Sudeste	86,92	6%
sul	48,58	6,5%

Fonte: IBGE/ Agência Nacional das Águas (2010)

Segundo (SOUSA, 2008), o ciclo hidrológico, Figura 1, é o movimento da água entre os continentes, oceanos e a atmosfera, definido como a sequência fechada de fenômenos pelos quais a água passa pelo globo, que abrange a fase do vapor, líquida e sólida. Esse ciclo é compreendido pelas componentes: precipitação pluvial, infiltração, escoamento superficial, evaporação, transpiração, evapotranspiração, sublimação e condensação.

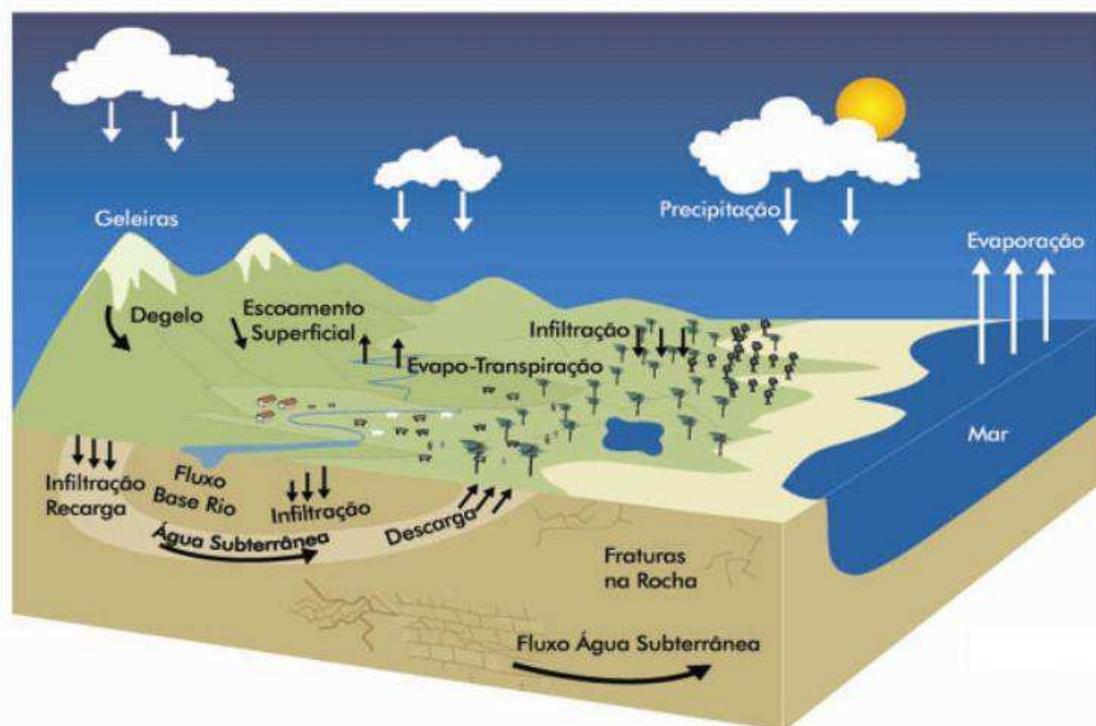


Figura 1: Ciclo hidrológico. Fonte: Ministério do Meio Ambiente.

2.1.1 Precipitação pluvial

É um processo pelo qual a atmosfera devolve a água que foi evaporada devido a radiação emitida pelo Sol. Tal fenômeno origina a formação de nuvens, vapor de água condensado, dependendo do tempo pode ser transformado em chuva, neve ou granizo, sendo um componente de entrada do ciclo hidrológico, a precipitação pluvial pode ser classificada de acordo com a duração, intensidade e frequência. Segundo Sousa (2008), a precipitação pluvial é a fonte de água que origina o ponto de partida para todas as análises hidrológicas de pequenas bacias hidrográficas.

A precipitação pluvial ocorre em todo o planeta com maiores abrangências nos oceanos, já que a sua extensão é maior que a continental e por ter maior quantidade de vapor disponível para a formação de nuvens. A água é devolvida aos continentes basicamente pela atmosfera enquanto que, nos oceanos, acrescentam-se, também, as águas advindas dos rios.

A precipitação pluvial é diferenciada em todo planeta, isso se deve às diferenças de temperaturas das regiões. Nas que recebem mais calor chove mais, já que a evaporação é alta, ocasionado uma grande quantidade de água precipitável para aquela área. Um exemplo seria a região equatorial, que recebe calor o ano todo, por este motivo é onde mais chove dentre as demais do planeta. No que diz respeito à região polar é a que menos chove, haja vista ser a que menos recebe calor durante o ano, não tendo grande disponibilidade de água precipitável. A vegetação também influencia nessa distribuição, a Amazônica é um exemplo, devido à evapotranspiração. Muitas árvores da região absorvem uma grande quantidade de água dos solos e emitem boa parte disso para o ar, como se fosse uma bomba d'água. Assim, quanto maior a quantidade de gotículas de água em forma de vapor que estiverem na atmosfera, maiores são as chances de chover. É por isso que lá as chuvas são mais do que frequentes.

2.1.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial talvez seja a fase mais importante do ciclo hidrológico e de maior importância para os engenheiros, pois é a etapa que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra e está diretamente ligada ao aproveitamento da água

superficial e à proteção contra os efeitos causados pelo seu deslocamento (erosão do solo, inundações, etc.).

Esse tipo de escoamento é presenciado fundamentalmente na ocorrência de precipitações e considera desde o movimento da água de uma pequena chuva que, caindo sobre um solo saturado de umidade, escoar pela sua superfície, formando as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação.

De acordo com Martins (1976) parte da água das chuvas é absorvida pela vegetação e outros obstáculos, a qual é evaporada posteriormente. Da quantidade de água que atinge o solo, parte é retida em depressões do terreno e parte é infiltrada. Após o solo alcançar sua capacidade de absorver a água, ou seja, quando os espaços nas superfícies retentoras tiverem sido preenchidos, ocorre o escoamento superficial da água restante.

Vários fatores podem influenciar o escoamento, os principais são os relativos a fatores de natureza fisiográfica. Os de natureza são os que estão ligados ao tipo de precipitação pluvial, que incluem a intensidade, duração e precipitação pluvial antecedente. Os fisiográficos são ligados a geomorfologia, como forma da bacia, tipo de solo, vegetação os quais condicionam a absorção da água na superfície. As intervenções humanas, também alteram o escoamento, como alteração da superfície do terreno, com a urbanização e as obras hidráulicas, ligadas à construção de barragens, canalização ou retificação e derivação ou transposição.

A razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado é conhecido como coeficiente de “runoff”. Este coeficiente pode ser relativo a uma chuva isolada ou relativo a um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram. Sabe-se que, conhecendo o coeficiente de “runoff” para uma determinada chuva intensa de uma certa duração, pode-se estimar o escoamento superficial de outras precipitações de intensidades diferentes, desde que a duração seja a mesma. Esse coeficiente é muito utilizado para se prever a vazão de uma enchente provocada por uma chuva intensa.

2.1.3 Evaporação

Definido como sendo uma vaporização do líquido que se dá na sua superfície livre, a uma temperatura menor do que a temperatura de ebulição. Como a evaporação decorre da grande energia cinética de algumas moléculas, ela é favorecida pelo aumento de

temperatura, ou seja, quanto maior for a temperatura, maior será a intensidade da evaporação.

A transferência de água da superfície do Globo para atmosfera, sob forma de vapor, dá-se por evaporação direta, por transpiração das plantas e dos animais e por sublimação, passagem direta da água da fase sólida para a de vapor. A energia solar é a principal fonte de energia térmica necessária para a passagem da água das fases líquida e sólida para a fase do vapor, dando origem as circulações térmicas atmosféricas que transportam vapor de água e deslocam as nuvens (Sousa 2006).

A evaporação depende de muitos fatores, os principais são a radiação incidente, a temperatura, velocidade do vento, umidade, estabilidade do ar e quantidade de água disponível. A mesma é medida em milímetros (mm) em que, um mm de água evaporada corresponde a um litro de água que se evaporou de uma superfície de um metro quadrado de área. Para sua medição utilizam-se evaporímetros que podem ser de vários tipos, os mais usados são o atmómetro e o tanque de evaporação.

O estudo da evaporação e evapotranspiração é de especial importância, mesmo quando são considerados apenas aspectos puramente meteorológicos. O vapor de água age como um eficiente meio de transporte meridional de energia, interferindo no balanço energético em escala planetária. As áreas que atuam como fontes importantes do vapor de água atmosférico, tais como a zona tropical dos oceanos e as florestas tropicais, representam sumidouros de energia. Reciprocamente, as porções da atmosfera que atuam como sumidouros de vapor de água são, concomitantemente, fontes de energia, face ao calor latente liberado quando o vapor de água à fase líquida ou sólida (Varejão-Silva, 2001)

2.1.4 Transporte de umidade na atmosfera.

De acordo com van der Ent e Savenije (2013) os processos energéticos intensivos e complexos que trazem umidade para um determinado local e causam chuva são altamente heterogêneos no espaço e variáveis no tempo. Por isso saber de onde vem exatamente a umidade que gera a precipitação é uma questão muito difícil de responder.

Entretanto, a umidade que possibilita disparar a precipitação sobre regiões continentais é oriunda de duas fontes: a primeira é a advecção de vapor d'água, proveniente de outras regiões através do transporte realizado pela circulação, e, a

segunda, é o vapor d'água local, que é proveniente da evaporação e transpiração à superfície de rios, lagos, oceanos e vegetação (SOUSA, 2015).

Gimeno et al. (2012) mostraram que as principais fontes e sumidouros de vapor d'água no globo podem ser identificados pelo balanço entre a evapotranspiração e a precipitação ($E - P$). De acordo com os autores, as principais fontes ($E > P$) estão localizadas ao longo dos centros subtropicais de alta evaporação, e os principais sumidouros ($E < P$) encontram-se na região da ZCIT e ZCPS (Zona de Convergência do Pacífico Sul) e em faixas de latitudes médias, onde a convecção de umidade proporciona altas taxas de precipitação. Adicionalmente, Trenberth et al. (2011) e Gimeno et al. (2012) explicam que em regiões oceânicas, a taxa de evaporação geralmente excede a taxa de precipitação, portanto, estas regiões funcionam como fonte, enquanto as áreas continentais atuam como sumidouros de umidade atmosférica.

Estudos anteriores identificaram os principais meios para o processo de precipitação em áreas específicas. A principal fonte de umidade para a América do Sul, já discutida em diversos trabalhos (Savenije, 1995a,b; Bosilovich e Chern, 2006; Gimeno et al., 2010; van der Ent et al., 2010; Goessling e Reick, 2011; van der Ent e Savenije, 2013), é o oceano Atlântico Tropical (Marengo, 1992; Fu et al., 2001; Uvo et al., 2000; Liebmann e Marengo, 2001; Marshall et al., 2001; Ronchail et al., 2002; Yoon e Zeng, 2010; Satyamurty et al., 2013a). Mas, estudos recentes e do passado continuam a enfatizar o papel das florestas no fornecimento de umidade para disparar a precipitação sobre as regiões continentais (SOUSA, 2015).

2.1.5 Modelos hidrológicos

A concepção da modelagem advém da representação de um sistema físico por meio de equações, ou seja, a representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato que, num dado intervalo de tempo, interrelaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (TUCCI, 1987). Esse fenômeno pode ser qualquer fato ou situação concreta de interesse científico, passível de descrição ou explicação como, por exemplo, os fenômenos hidrológicos. Dessa forma, qualquer modelo é resultado da criatividade e do conhecimento que o modelador possui a respeito do

fenômeno observado, por esse motivo, um único fenômeno pode ser modelado de várias maneiras (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os primeiros modelos chuva-vazão surgiram na década de 80 e eram bastante rústicos, um deles foi SMAP. Em 1981(Lopes et al. apud Nascimento 2004) escreveu um artigo descrevendo como o modelo funcionava, e como se comportou em algumas bacias, já que era bastante simples, pois na época não se tinha toda a tecnologia existente de hoje. Funcionava com dados de chuva diária e valores médios mensais de evaporação potencial. O SMAP é fundamentado em três reservatórios lineares, que representam a superfície e as zonas não saturadas e saturadas do solo, nos quais é processado o balanço da umidade do solo. O modelo utiliza a equação de escoamento superficial do Soil Conservation Service (SCS) para o cálculo da chuva excedente, e é formado por poucos parâmetros, que são facilmente definidos em função do tipo de solo e cobertura vegetal. Este modelo é bem eficiente, haja vista que a diferença entre os dados coletado e simulado fica em torno de 20%.

Segundo Tucci (2005) os modelos surgiram de acordo com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas das vazões para diferentes projetos e recursos hídricos. De acordo com (FILHO *et al.*, 2012) um grande problema de se estudar a vazão chuva era a falta de dados, já que as séries que contém dados de chuva são maiores que as de vazões, e devido ações antrópicas no meio ambiente, as series temporais dos rios das bacias deixaram de ser homogêneas e estacionárias. E tais modelos foram surgindo à medida que cada necessidade surgia, exigindo uma solução para o problema, a fim de se aperfeiçoar cada vez mais a realidade, gerando diferentes modelos com diferentes configurações (LOU, 2010).

Graças ao grande avanço da tecnologia e o surgimento de computadores com alta capacidade de processamento de dados é possível hoje termos um modelo que represente de forma mais próxima possível da realidade os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. O avanço tecnológico foi tão grande que os objetivos dos modelos se ampliaram (ROCHA, 2017). Segundo, Lanna (1985 apud MARWELL) as técnicas de simulação permitem: a) estudar e experimentar as complexas interações internas de um determinado sistema hidrológico ou de recursos hídricos; b) oferecer valiosa introspeção no sentido do conhecimento das variáveis mais atuantes no sistema e caracterizar a influência destas variáveis sobre tal sistema, e; c) fornecer previsão a respeito de situações sobre as quais se têm pouca ou nenhuma informação.

Modelo hidrológico abarca um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso do solo e para prever alterações futuras nos ecossistemas (SILVA, 2007). Os modelos são ferramentas de análise importantes, porque eles podem ser usados para entender processos hidrológicos, analisar o desempenho de práticas de manejo, bem como avaliar os riscos e benefícios advindos de diferentes tipos de uso do solo (SPRUILL et al., 2000)

De forma geral, nas últimas décadas, os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: modelos que buscam representar com maior precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos; e modelos que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande magnitude (FILHO *et al.*, 2012). Essa visão está relacionada com a escala dos processos no sistema físico (FAYAL, 2008).

Como os modelos hidrológicos trabalham com o ciclo hidrológico, eles abrangem a precipitação pluvial, evaporação, infiltração e escoamento em rios. Essa abrangência desses modelos, depende de muitos fatores, o que dificulta suas análises. Segundo Mota (1999), citado por Moreira (2005), o objetivo de um modelo hidrológico é determinar, com eficiência e precisão, os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e estimar eficientemente o comportamento e a magnitude da oferta de água.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da estrutura dos modelos hidrológicos, com diferentes processos hidrológicos inseridos para representar as partes do ciclo hidrológico.

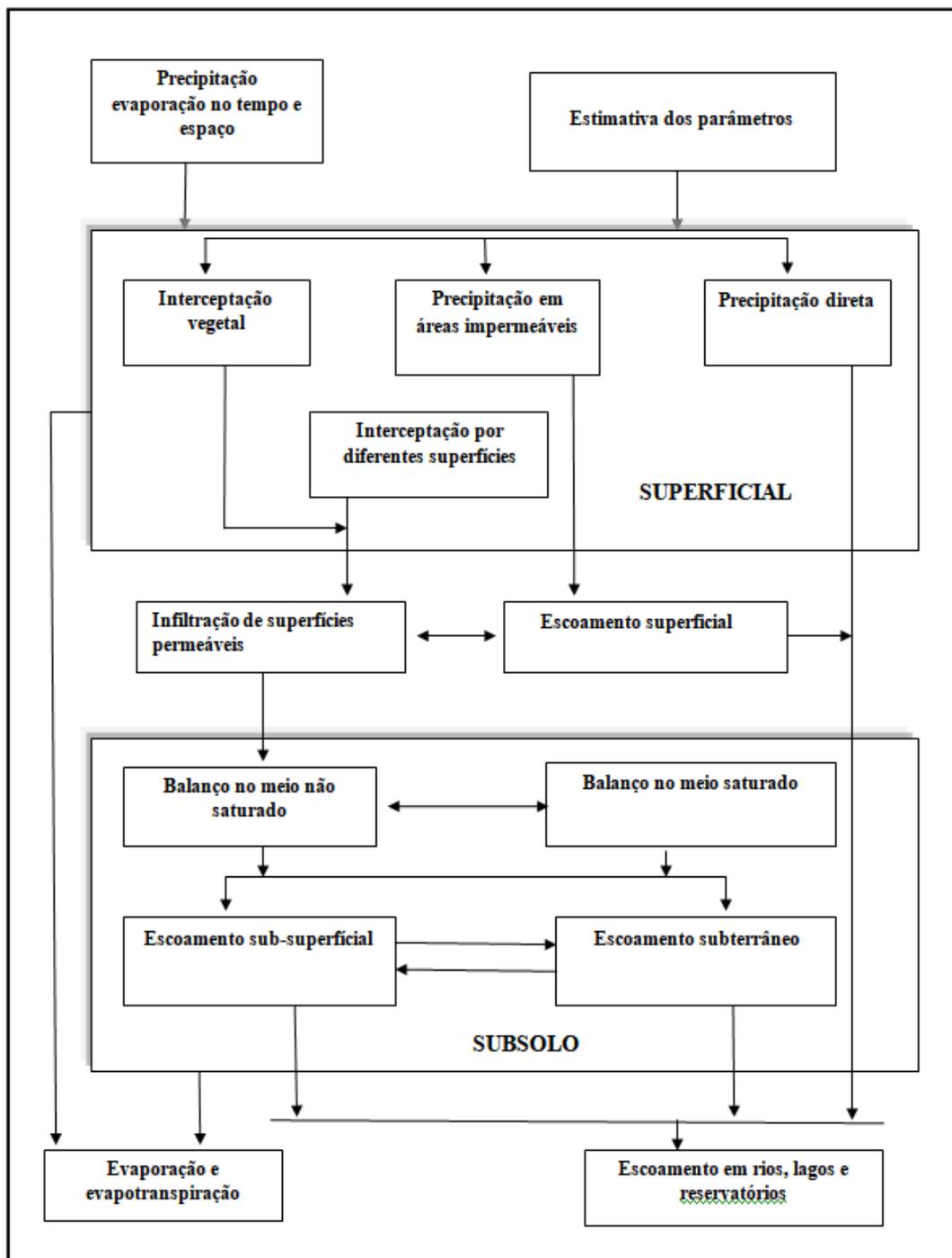


Figura 2: Representação esquemática. (Fonte : Tucci,2005)

2.2 Classificação dos modelos de simulação chuva-vazão

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos (Figura 3). Comumente, os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos). (MOREIRA, 2005).

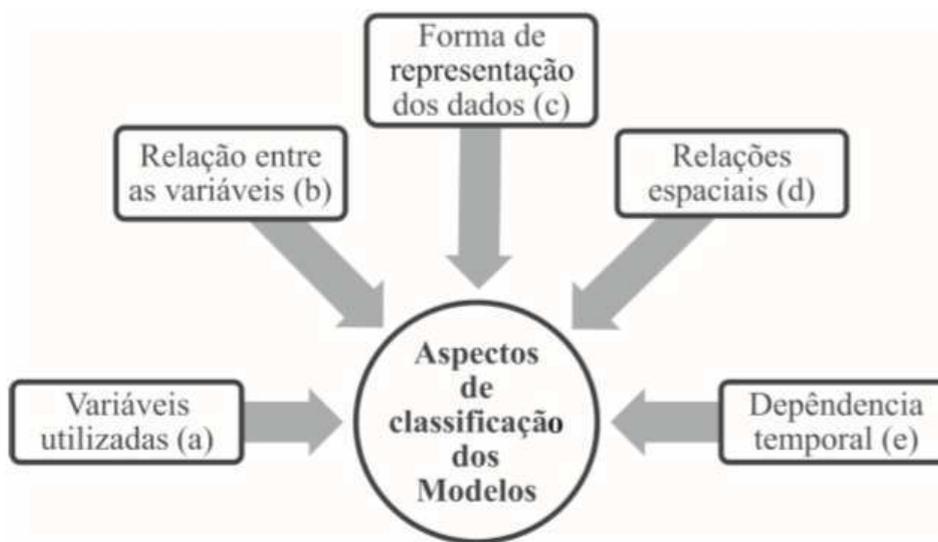


Figura 3: Aspectos de classificação dos modelos hidrológicos. (Fonte: Marinho Filho 2012).

2.2.1 Modelos Estocástico e Determinístico

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Por exemplo, o nível futuro de um reservatório depende da vazão afluente futura, que é uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Nota-se, no entanto, que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. Sistemas

multivariados não lineares podem levar a resultados caóticos que erroneamente são interpretados como variáveis aleatórias (FAYAL, 2008).

2.2.2 Modelos Conceitual e Empírico

Os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão. (TUCCI, 1998)

Alguns autores utilizam uma subdivisão na classificação dos modelos conceituais: semi-conceituais e físicos ou físico-distribuídos. Os primeiros se referem aos modelos que relacionam características do processo, mas mantêm um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas. Por sua vez, os físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos, e os seus parâmetros são os que mais se aproximam da física do sistema. As dificuldades dos modelos físicos têm residido sempre na variabilidade espacial dos processos e na dificuldade de estimar os parâmetros (FAYAL, 2008).

2.2.3 Modelos Concentrado e Distribuído

Modelos concentrados são aqueles que não consideram a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo modelado. Nesses modelos, a principal variável é o tempo. Na modelagem concentrada do processo chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, por exemplo, todas as variáveis do sistema são avaliadas em termos da média espacial. Isso significa que chuva, evaporação, infiltração, vazões e outras variáveis são consideradas em termos médios na bacia. Considera-se que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada (FAYAL, 2008). Por outro lado, os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. Nesse caso, as variáveis e parâmetros do modelo dependem do tempo e do espaço. Os modelos distribuídos aplicam a lei da conservação de massa em escala local e utilizam como

dado de entrada uma grande quantidade de informações que definem as características espaciais da bacia hidrográfica (CUNHA, 2004).

2.2.4 Modelos Estacionário e Dinâmico

Os modelos podem ser estacionários, onde descrevem o fenômeno em determinado momento, os parâmetros não variam com o tempo. Já nos modelos dinâmicos os parâmetros podem variar no tempo, sendo, portanto, as variáveis função do tempo. (MARINHO FILHO, 2012).

2.2.5 Modelos Discreto e Contínuo

Um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva a modelagem de períodos isolados da série, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes, contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Em decorrência disso, esses modelos apresentam estrutura mais detalhada, desenvolvida para simular com maior exatidão todas as fases do ciclo hidrológico. Mesmo os modelos contínuos no tempo apresentam discretização temporal, denominada passo de cálculo, pois, muitas vezes, os fenômenos do ciclo hidrológico são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo do modelo depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração desses resultados (RENNOÓ e SOARES, 2003).

Segundo Nascimento (2004), os modelos de simulação chuva-vazão podem ser classificados em físicos, analógicos e matemáticos.

Modelo Físico – busca o entendimento de certos fenômenos pelo estudo de um sistema semelhante, em proporções menores. Os também conhecidos modelos reduzidos têm seu uso dirigido a sistemas muito complexos, de difícil equacionamento matemático.

b) Modelo Analógico – utilizado para prever e interpretar fenômenos que têm conteúdo e forma diferenciados, porém apresentam semelhança na estrutura ou lei de formação.

c) Modelo Matemático – este modelo procura simular e entender um determinado sistema através de equações matemáticas, formadas por variáveis e parâmetros. Os modelos matemáticos na concepção de (Tucci 1985 apud Marwell) são versáteis, permitindo facilmente modificar-se a lógica do modelo e obter-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade obtida no seu processamento em microcomputadores

A Figura 3 exibe esquematicamente a classificação dos modelos de transformação chuva/vazão

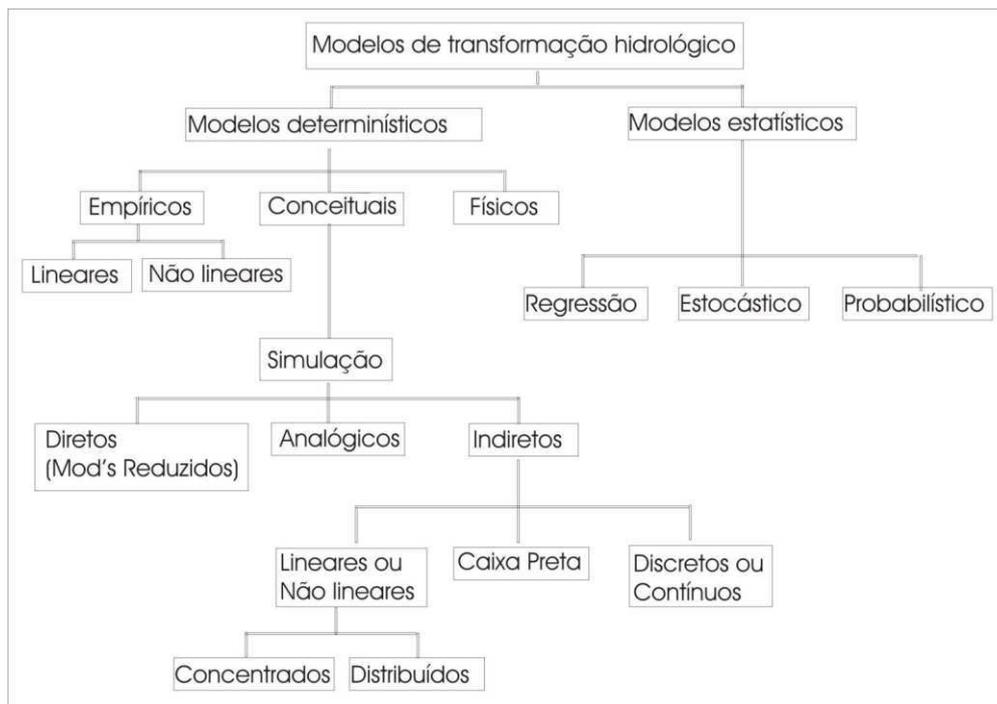


Figura 4: Classificação dos modelos hidrológicos. (Fonte: Rocha, 2017)

2.2.6 Modelo IPH II

Este modelo foi desenvolvido pelo IPH/UFRGS (Instituto de Pesquisa Hidráulica/Universidade Federal do Rio Grande do Sul), no final da década de 70. O modelo IPH II faz parte de uma família de modelos desenvolvidos pelo IPH, sendo um modelo determinístico - conceitual, para simulação chuva-vazão. O IPH II tem como uma de suas características, ser um modelo simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseado em metodologias bem difundidas. (MOREIRA, 2005)

O modelo é composto pelos seguintes algoritmos: i) Perdas por evaporação e interceptação, ii) Separação de escoamento, iii) Propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos e iv) otimização dos parâmetros (quando for de interesse do usuário) (TUCCI, 1987).

Tucci (1987) apresenta as seguintes considerações sobre o modelo IPH II: i) representa os principais fenômenos do processo chuva-vazão na bacia, isto é, perdas por interceptação (vegetação e depressões) e evaporação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo; ii) a variável utilizada na interceptação é o volume R, retido no reservatório num dado instante, e o parâmetro correspondente é a capacidade máxima deste reservatório; iii) no algoritmo de evaporação, as variáveis de entrada são a precipitação pluvial e a evaporação potencial; iv) a evaporação real é calculada em função do estado de umidade do solo e da sua capacidade máxima, em função dos outros parâmetros; v) o modelo permite o início da simulação sem grandes erros, após um período sem chuvas superior ao tempo de concentração da bacia, não havendo a necessidade de três a seis meses de simulação para inicialização; vi) o ajuste manual dos parâmetros depende da sensibilidade adquirida pelo hidrólogo; vii) para bacias onde não existem dados, é possível usar valores dos parâmetros encontrados na literatura, embora as incertezas possam ser grandes; viii) o tempo de percurso pode ser dependente da vazão máxima do hidrograma, o que é razoável, tendo em vista que o escoamento superficial não é um processo linear; ix) a principal desvantagem do modelo é o empirismo dos parâmetros, encontrado na maioria dos modelos hidrológicos; x) o algoritmo é bastante simples e pode ser processado em uma calculadora programável.

2.2.7 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo matemático de parâmetro distribuído, desenvolvido em escala de bacia hidrográfica com a finalidade de permitir que um número de diferentes processos físicos seja simulado em bacias hidrográficas permitindo a realização de uma análise os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água.

O modelo foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura norte-americano USDA, Agricultural Research Service (ARS), em Temple, no estado do Texas, e é uma ferramenta de domínio público. Incorpora características de diversos modelos criados no ARS e é resultado direto do modelo SWRRB (Simulator for Water

Resources in Rural Basins) com o modelo ROTO (Routing Outputs to Outlet). Os modelos específicos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento do SWAT foram: USLE (Equação Universal da Perda de Solos), CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) e EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (NEITSCH et al., 2011b; ARNOLD e FOHRER, 2005).

O modelo SWAT tem muitas características, algumas são descritas por Arnold et al., (1998); Neitsch et al., (2011a) Souza et al., (2009), as principais são:

1. É um modelo que possui base física, com equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. Requer como entradas informações sobre clima, solos, relevo, vegetação e uso e manejo do solo. Através destas informações, o SWAT modela os processos físicos associados com o movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento da vegetação, ciclagem de nutrientes, qualidade da água etc. O aspecto positivo dessa característica do modelo é que bacias hidrográficas sem dados de monitoramento também podem ser modeladas;
2. É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
3. É distribuído, o modelo SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias e essas sub-bacias são divididas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's - Hydrological Response Units), que permite a simulação e análise de diferentes usos e tipos de solo da bacia hidrográfica, sem aumentar demasiadamente o número de dados necessários;
4. Para as funções mais básicas, o modelo utiliza informações de fácil acesso, disponíveis em agências governamentais.
5. O modelo encontra-se em constante desenvolvimento pelos autores e novas versões poderão incluir novos processos ainda não contemplados.

Segundo Arnold et al. (1993) o SWAT foi desenvolvido para prognosticar o efeito de diferentes cenários com diferentes características de terreno, clima, solo,

vegetação e topografia em bacias hidrográficas, num intervalo de tempo determinado.

2.3 Sistemas atuantes no Nordeste brasileiro e na bacia hidrográfica em estudo

O Nordeste Brasileiro (NEB) é conhecido como uma região com alta variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial, esse fato, impulsiona a ocorrência de déficit hídrico durante o período de estiagem e condiciona as características climáticas e as variáveis meteorológicas (MOLION e BERNARDO, 2002). De acordo com os autores essa variabilidade é influenciada pela temperatura do mar (TSM) dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial. Já que as temperaturas desses oceanos interferem diretamente no posicionamento dos sistemas precipitantes, a região poderá ser favorecida com chuvas.

De acordo com Uvo e Berndtsson (1996) cinco mecanismos governam o regime de chuva na região: I) Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); II) Temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do Oceano Atlântico, Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM); III) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico, IV) Frentes Frias, e V) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Além desses podemos também destacar as linhas de instabilidade (LI)

Segundo Rocha (2017) no estado da Paraíba ocorrem três tipos climáticos: o clima Tropical Quente-úmido, com chuvas de outono-inverno, o clima Semiárido quente e o clima Quente Semiúmido, com chuvas de verão. Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no Nordeste brasileiro podem ser classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis por cerca de 30 a 80% da precipitação pluvial e mecanismos de meso e microescalas. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se os Sistemas Frontais e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios, complexos convectivos e Brisas Marítima e Terrestre fazem parte da mesoescala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas constituem os fenômenos de microescala.

Um dos principais sistemas que traz produz chuvas no estado da Paraíba é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esse sistema é de escala planearia e é caracterizado como uma banda de nebulosidade convectiva contínua ou não, que atua durante todo o

ano na região equatorial, porém ela atinge sua posição mais ao Sul do planeta (em torno de 5° S) em março-abril. Tal sistema é influenciado pela temperatura dos oceanos. Segundo os estudos efetuados por Ferreira e Melo (2005) o El Niño quando acontece conjuntamente com o dipolo positivo do Atlântico (Dipolo do Atlântico: diferença entre a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar-TSM na Bacia do Oceano Atlântico Norte e Oceano Atlântico Sul), que é desfavorável às chuvas, causam anos secos ou muito secos no NEB. O fenômeno La Niña (resfriamento anômalo das águas do Oceano Pacífico) associado ao dipolo negativo do Atlântico (favorável às chuvas) é normalmente responsável por anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na região. Por fim, quando as águas do Pacífico estão em condições normais e o dipolo do Atlântico negativo (positivo), a probabilidade de se ter um ano normal ou chuvoso (seco) também é alta.

Outro sistema sinótico que pode trazer chuvas para essa região é o Vórtices Ciclônico de Ar Superior (VCAS). Os VCAS se formam geralmente no setor norte do Nordeste e em áreas oceânicas adjacentes. Ocorrem preferencialmente no final da primavera, no verão e início do outono de cada Hemisfério. São quase estacionários e geralmente perduram por vários dias. Caracteriza-se por movimentos subsidentes e ascendentes do seu centro para a borda. Essa característica produz chuvas nas bordas e estiagem no centro. Tal distribuição de chuva depende de onde o sistema se formou e onde se localiza o seu centro (ROCHA 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Região de estudo

A bacia hidrográfica do rio Piancó (BHRP) está localizada na região Semiárida do Brasil, (Figura 4), situada entre os paralelos de 6,861° e 8,303° S e os meridianos de 36,021° e 37,356°, no sudoeste do estado da Paraíba, próximo as fronteiras do Ceará, ao norte e de Pernambuco, ao sul do Alto e Médio Piranhas e a oeste da bacia do rio Espinharas.

Em termos climatológicos a BHRP está inserida no denominado “Polígono das Secas”, constituindo um tipo de clima quente e seco, segundo a classificação de Köppen. As temperaturas são elevadas durante o dia e amenas a noite, com variações anuais num intervalo entre 23 e 30° C. O regime pluviométrico, além de baixo é irregular com médias anuais de 751,1 mm/ano com mínimas e máximas de 180,0 e 1511,8 mm/ano. Em geral caracteriza-se pela presença de apenas duas estações: a seca que constitui o verão, cujo clímax é de setembro a dezembro e a chuvosa denominado pelo sertanejo de inverno, restrito a um período de três a quatro meses por ano. A umidade relativa do ar média anual varia de 64% a 72%.

A vegetação é de pequeno porte, típica de caatinga xerofítica, onde se destacam a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno e médio porte. Os solos são resultantes da desagregação e decomposição das rochas cristalinas do embasamento, sendo em sua maioria do tipo Podizólico Vermelho-Amarelo de composição arenoargilosa, com latos solos e porções restritas de solos de aluvião.

A rede de drenagem é do tipo intermitente e seu padrão predominante dentrítico, devido a existência de fraturas geológicas, mostra variações para retangular e angular. Todo esse complexo abrange por completo ou parcialmente os municípios de Água Branca, Aguiar, Boa Ventura, Catingueiras, Conceição, Coremas, Curral Velho, Diamante, Emas, Ibiara, Igaracy, Imaculada, Itaporanga, Juru, Manaíra, Nova Olinda, Olho D'Água, Pedra Branca, Piancó, Pombal, Princesa Isabel, Santana dos Garrotes, Santana de Mangueira, São João de Caiana, Serra Grande, e Tavares, ocupando uma área de aproximadamente 9.274,20 Km².

A agropecuária é a principal atividade econômica da região, onde se destaca a pequena agricultura de subsistência de feijão, milho consorciado e a pecuária extensiva. O cultivo de algodão arbóreo (“mocó”) já foi uma importante atividade econômica na

região, e, ao contrário do algodão comum, era um cultivo perene, resistente à seca, que alimentava um grande número de usina de beneficiamento, e que além de uma fibra de excelente qualidade, tinha como subprodutos óleo vegetal e ração animal (torta de algodão). Era uma fonte de renda segura para o produtor. No final dos anos 80 com a chegada do bicudo, praga de difícil controle nas condições da região e depois com a abertura do mercado nacional às importações subsidiadas de países da Ásia nos anos 90, a cultura, que no início dos anos 80 era plantada em mais de 2 milhões de hectares no Nordeste, entrou em declínio, e hoje a área cultivada está em torno de 1.300 hectares.

A agricultura irrigada foi adotada como estratégia de desenvolvimento regional, pelo governo federal, através do DNOCS, e mais recentemente pelos governos estaduais.

Segundo o comitê da bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas (2017), um dos problemas preocupantes, e relativamente recente, é a ocorrência de florações de cianobactérias nos reservatórios da Bacia. Essas bactérias podem produzir toxinas, que não são removidas por métodos de tratamento de água convencionais, e que podem inclusive contaminar peixes tornando-os impróprios ao consumo. Uma provável causa para a ocorrência do problema é o lançamento de esgotos não tratados nos corpos hídricos da Bacia. Considerando que a água acumulada nos reservatórios é a principal, senão a única fonte disponível para abastecimento humano e animal, faz-se necessário uma priorização de investimentos por parte do poder público para saneamento ambiental.

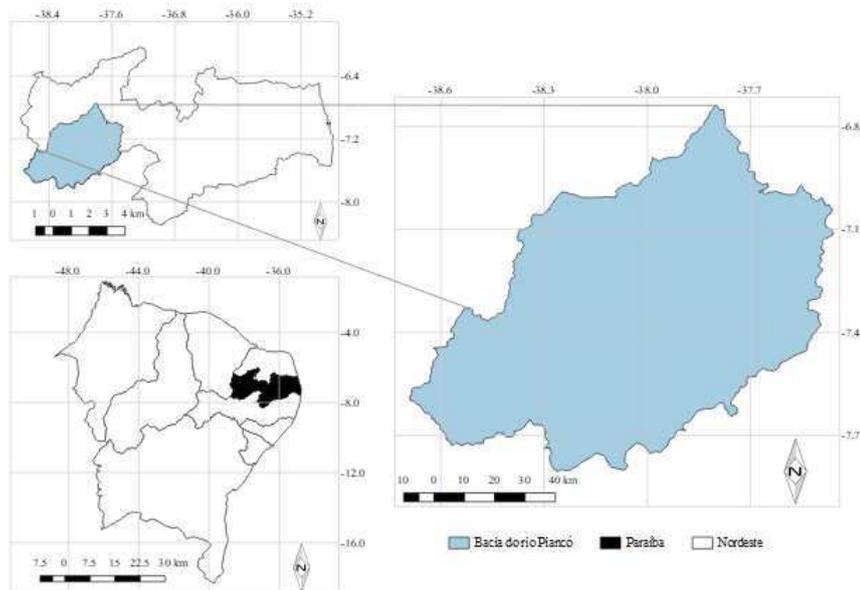


Figura 5: Bacia hidrográfica do rio Piancó – PB.

Três razões que justificam a escolha dessa bacia para aplicar o modelo proposto:

1. A bacia apresenta características hidrometeorológicas típicas do Semiárido brasileiro;
2. Possui uma boa densidade espacial de postos pluviométricos que fornecem dados históricos de longa duração;
3. Ela pode ser considerada de porte médio, representando as bacias contribuintes de reservatórios do Nordeste do Brasil, que possuem áreas de 200 km² a 15.000Km².

Tabela 2: Municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Piancó – PB e respectivas coordenadas geográficas.

Ordem	Longitude (°)	Latitude (°)	Município
1	-7,51	-37,63	Água Branca
2	-7,09	-38,17	Aguiar
3	-7,42	-38,21	Boa Ventura
4	-7,12	-36,60	Catingueira
5	-7,56	-38,50	Conceição
6	-7,02	-37,94	Coremas
7	-7,53	-38,19	Curral Velho
8	-7,42	-38,26	Diamante
9	-7,10	-37,51	Emas
10	-7,50	-38,40	Ibiara
11	-7,17	-38,14	Igaracy
12	-7,38	-37,50	Imaculada
13	-7,3	-38,15	Itaporanga
14	-7,54	-37,80	Juru
15	-7,70	-38,15	Manaíra
16	-7,48	-38,04	Nova Olinda
17	-7,22	-37,75	Olho D' Água
18	-7,41	-38,06	Pedra Branca
19	-7,21	-37,92	Piancó
20	-6,77	-37,80	Pombal
21	-7,73	-37,99	Princesa Isabel
22	-7,38	-37,98	Santana dos Garrotes
23	-7,55	-38,33	Santana de Mangueira
24	-7,25	-38,29	São João de Caiana
25	-7,21	-38,37	Serra Grande
26	-7,63	-37,87	Tavares

3.1 Dados

3.1.1 Precipitação

Para o estudo foram considerados dados mensais de precipitação, adquiridos juntos a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). O período estudado compreende um total de anos 55 anos, com nove postos pluviométricos representativos da bacia. Esses postos são: Boa Ventura, Conceição, Ibiara, Itaporanga, Manaíra, Nova Olinda, Piancó, Princesa Isabel e Santana dos Garrotes, como pode ser vistos na Figura 6.

O estudo é baseado no período de 1994 a 2019, porém foram tomadas as médias dos meses durante o período a fim de determinar quais eram os seis meses mais chuvosos de

cada posto para gerar uma vazão na exutória da bacia, sendo assim o período mais chuvoso foi estabelecido entre os meses de dezembro a maio, portanto tendo um total de 150 dados, tendo início em dezembro de 1994 e final em maio de 2019, como pode ser visto na Tabela A1 no Apêndice A.

Alguns anos apresentaram falta de dados e foram preenchidos com a média dos meses, tal procedimento foi feito para os meses de abril e maio de 2012 para a cidade de Boa ventura, maio de 2018 para Conceição, abril e maio de 2018 para Itaporanga.

3.1.2 Vazão

Vazão é o volume de água que passa por uma determinada área por um uma unidade de tempo. É usualmente dado em litros por segundo (l/s), metros cúbicos por segundo (m^3/s), ou metros cúbicos por hora (m^3/h).

Para este estudo foram obtidos dados de vazões mensais da estação fluviométrica da bacia do rio Piancó junto a ANA - Agência Nacional das Águas. A Figura 6 exhibe a bacia em estudo (incluindo estações pluviométricas e fluviométrica) e Tabela 3 exhibe os postos pluviométricos com suas respectivas latitudes e longitudes.

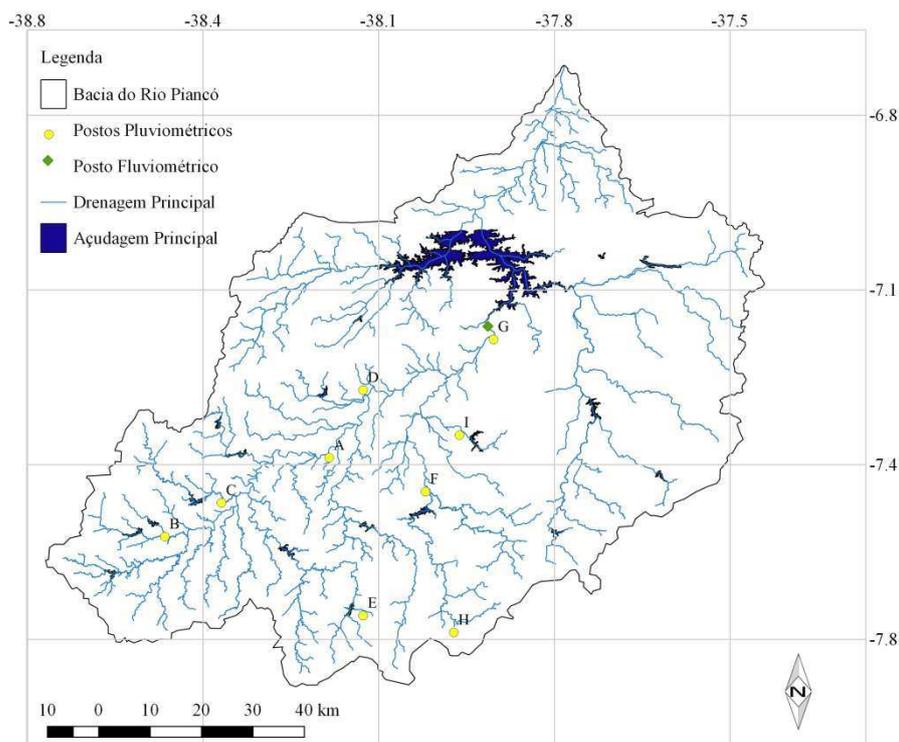


Figura 6: Postos pluviométricos e estação fluviométrica da bacia do rio Piancó – PB.

Tabela 3: Postos que foram selecionados da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB e respectivas coordenadas geográficas, e siglas adotadas.

Ordem	Longitude (°)	Latitude (°)	Município
A	-7,42	-38,21	Boa Ventura
B	-7,56	-38,50	Conceição
C	-7,50	-38,40	Ibiara
D	-7,3	-38,15	Itaporanga
E	-7,70	-38,15	Manaíra
F	-7,48	-38,04	Nova Olinda
G	-7,21	-37,92	Piancó
H	-7,73	-37,99	Princesa Isabel
I	-7,38	-37,98	Santana dos Garrotes

3.4 Modelo de Regressão Linear Múltipla

A metodologia utilizada para a modelagem hidrológica foi do tipo empírico, desenvolvida a partir de funções baseadas em análises estatísticas de correlação e regressão linear. Para identificar a correlação existente entre as vazões médias mensais observadas e os totais mensais precipitados foram efetuadas defasagens de um, dois e três meses, considerado que esse tempo corresponde a resposta do escoamento superficial e subsuperficial de toda a água precipitada na bacia em estudo e escoada até a sua seção transversal ou exutória. Os melhores coeficientes de correlação obtidos entre esses tempos de respostas foram submetidos ao método de regressão linear múltipla para determinar o melhor ajuste da equação chuva-vazão para representar o balanço hídrico da bacia. O coeficiente de correlação é uma medida da intensidade ou do grau de associação entre as variáveis analisadas. O método estatístico para cálculo do coeficiente de correlação foi estabelecido por Karl Pearson em 1896. Por essa razão é denominado Coeficiente de Correlação de Pearson (r). O cálculo de r será realizado entre as séries históricas de vazões médias mensais e as series históricas de totais mensais precipitados, conforme a Equação (1)

$$r = \frac{\sum(C-\bar{C})(Q-\bar{Q})}{\sqrt{\sum(C-\bar{C})^2 \sum(Q-\bar{Q})^2}} \quad (1)$$

Em que:

r = coeficiente de correlação

C = Precipitação;

Q = Vazão;

\bar{C} é a média da precipitação observada;

\bar{Q} é a média da vazão observada.

O Modelo de Regressão Linear Múltipla é um modelo empírico que, ao ser construído considera as relações empíricas entre as variáveis observadas, sem necessariamente representar o comportamento físico dos processos, sendo de fácil ajuste e avaliação. Este modelo é aplicado para uma variável dependente que se deseja estimar, cuja serie histórica apresenta fortes relações com outras variáveis, sendo que essas relações se associam ao fenômeno (ou processo) que se deseja modelar. Como este estudo busca analisar as melhores variáveis que tornam o modelo mais preciso, não considerando somente as próprias vazões defasadas, mas também outras variáveis em diferentes defasagens, como a precipitação pluvial, tal método atende o objetivo do estudo, assim como em outros estudos que demonstram sua habilidade para tais fins (Cardoso e Silva Dias, 2002; Grimm et al., 2004).

Cardoso (2005) utilizou este modelo para verificar a relação entre a TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico e as condições climáticas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Já Alexandre (2012) analisou o impacto da incorporação de informações climáticas na previsão de vazões mensais para o Sistema Interligado Nacional. Malfatti et al. (2014) utilizaram para a previsão de vazão na usina hidrelétrica de Itaipu.

O modelo de Regressão Linear Múltipla fornece a relação entre uma determinada variável dependente e outras variáveis independentes, seus parâmetros são determinados pelo método dos mínimos quadrados (Wilks, 2006). A equação de regressão, Eq. (2) possui a seguinte forma:

$$Q_i = b_0 + b_1P_1 + b_2P_2 + b_3P_3 + \dots + b_kP_k \quad (2)$$

Em que V_i é a variável dependente (vazão a ser prevista); P_i são as variáveis independentes (variáveis escolhidas que contribuem para a estimativa da vazão); b_0 é a intersecção da reta com o eixo de y ; b_i são os coeficientes de regressão.

3.3 Critérios para entrada/saída de variáveis independentes do modelo chuva-vazão

O método de seleção de entrada e saída de variáveis no modelo hidrológico chuva-vazão foi o “forward stepwise”. A melhoria ou não do modelo chuva-vazão de acordo com a entrada e saída de variáveis independentes usando a metodologia “forward stepwise”, foi verificada com base na estimativa do coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado). A Figura 6 resume a metodologia “forward stepwise” para seleção de entrada/saída de variáveis independentes no modelo chuva-vazão.

Este método é realizado de forma interativa, adicionando e removendo variáveis, a partir de um critério de seleção, sendo o teste F o critério utilizado para a escolha das variáveis que contribuem significativamente para a regressão (Draper e Smith, 1998).

No conjunto de variáveis independentes pode haver variáveis que apresentam pouca influência na variável resposta ou variável dependente, não contribuindo para a melhoria da estimativa ao se agregar ao conjunto de preditores. O método stepwise é utilizado para adicionar e remover variáveis independentes de um modelo de regressão linear múltipla com base em sua significância estatística, podendo assim, reduzir o número de variáveis que compõe a equação de regressão final (Draper e Smith, 1998).

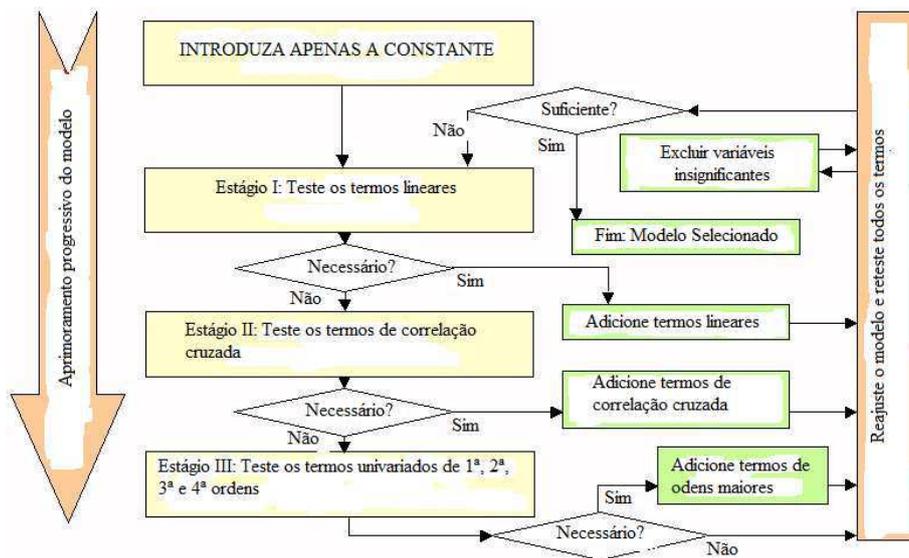


Figura 7: Método “forward stepwise” para seleção de entrada/saída de variáveis independentes no modelo.

3.5 Avaliação do modelo

Visando minimizar a subjetividade da comparação visual entre as curvas de vazão observada e estimada, o desempenho do modelo foi testado por meio de três funções:

1. Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - NSE - Equação (3);
2. Porcentagem de viés (PBIAS - Equação (4); e
3. Raiz do erro quadrático médio - RMSE - Equação (5).

O NSE foi proposto por Nash e Sutcliffe em 1970 e, por isso, é conhecido pelo nome de seus autores. Esse coeficiente vem sendo amplamente utilizado na avaliação estatística do desempenho de modelos hidrológicos (Ale et. Al., 2012). O NSE é descrito pela Equação (3).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_i - V_i)^2}{\sum_i^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (3)$$

Em que:

NSE é o coeficiente de Nash e Sutcliffe;

Q_i é a vazão observada;
 V_i é a vazão simulada; e
 \bar{Q}_i é a média da vazão observada.

O NSE varia entre $-\infty$ e 1,0. Uma eficiência menor do que 0 indica que a média é um melhor preditor do que o modelo. A eficiência ótima tem valor igual a 1,0 (Gupta et al., 1999).

A porcentagem de viés (PBIAS) mede a tendência de os dados simulados serem menores ou maiores do que os dados observados (Gupta; Sorooshian; Yapo, 1999). O seu valor ótimo é 0, com valores baixos indicando uma simulação acurada (MORIASI et al., 2007). A equação do PBIAS é descrita pela Equação 4.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \right] * 100 [\%] \quad (4)$$

Em que:

PBIAS é a porcentagem de viés;
 V_i é a vazão simulada;
 Q_i é a vazão observada.

Valores positivos de PBIAS indicam que o modelo está superestimando os valores de vazão, enquanto valores negativos indicam que o modelo subestima esses valores. Uma avaliação proposta por Moriasi et al., (2007) determinou diretrizes para avaliação dos modelos hidrológicos distribuindo os valores dos coeficientes NSE e PBIAS em quatro categorias (insatisfatório; satisfatório; bom; e muito bom), conforme a Tabela 4

Tabela 4: Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe e porcentagem de viés.

Avaliação do desempenho	Coefficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe	Porcentagem de viés
Muito bom	0,75<NSE<1,00	-10<PBIAS<+10
Bom	0,65<NSE<0,75	+10<PBIAS<+15 ou -15<PBIAS<-10
Satisfatório	0,50<NSE<0,65	+15<PBIAS<+25 ou -25<PBIAS<-15
Insatisfatório	NSE<0,50	PBIAS>+25 ou PBIAS<-15

NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS: porcentagem de viés. Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Tais coeficientes analisam a concordância do escoamento modelado com o escoamento superficial observado na área de estudo. Para análise do volume escoado, foi utilizado o valor da RMSE (Equação 4), uma medida bem-aceita do erro absoluto das predições dos modelos (HARMEL & SMITH, 2007). O menor valor de RMSE indica o melhor ajuste entre os valores simulados e observados.

$$RMSE = n^{-1} \sum_{i=1}^n [(V_i - Q_i)^2]^{0,5} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (5)$$

Em que:

RMSE é a raiz do erro quadrático médio;

V_i é a vazão simulada;

Q_i é a vazão observada.

A qualidade do ajuste da equação de regressão também está relacionada com Coeficiente de Determinação R^2 , quanto menor for este espalhamento, melhor a representação do conjunto de valores observados. O valor de R^2 varia entre 0 e 1. Se for igual a 1, existirá uma correlação perfeita entre as séries históricas, caso contrário a variância não explicada dominará o processo de combinações lineares múltiplas.

Na avaliação da eficácia da simulação do modelo hidrológico, serão aplicados os coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe CNS e sua versão; e desvio entre vazões

observadas e simuladas D (Liew et al., 2003). Para o coeficiente de Nash-Sutcliffe C_{NS} será aplicada a Equação 6, onde Q e Q_c são às vazões observadas e calculadas, respectivamente, em m^3/s . Segundo Zhang et al (2007), o valor do coeficiente Nash-Sutcliffe indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, podendo variar de 0 a 1. O C_{NS} está associado à eficiência de estimativa de vazões doo hidrograma. Moriasi et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação para este coeficiente, utilizando passo de simulação: $C_{NS} > 0,65$ o modelo é considerado muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, o modelo é considerado bom e entre 0,5 e 0,54 satisfatório. Segundo Zaapa (2002), valores de C_{NS} acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação.

$$CNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - V_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (6)$$

Em que:

CNS é coeficiente estatístico de Nash-Sutcliffe;

V_i é a vazão simulada;

Q_i é a vazão observada;

\bar{Q}_i é a média da vazão observada.

Para avaliar o desvio entre vazões observadas e simuladas, Liew et al. (2003) apresentam os seguintes intervalos e respectivas interpretações de D : $< 10\%$, muito bom; entre 10% e 15% , bom; entre 15% e 25% , satisfatório e $> 25\%$, o modelo produz estimativas inadequadas no tocante à tendência (Equação 7).

$$D\% = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - Q_i) * 100}{Q_i} \quad (7)$$

Em que:

$D\%$ é o desvio entre vazões observadas e simuladas;

V_i é a vazão simulada;

Q_i é a vazão observada;

N é o número de observações

3.6 Calibração e Validação do Modelo

Na validação do modelo busca-se atingir o melhor ajuste, ou seja, nesta etapa determina-se o grau em que o modelo é capaz de realizar uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva de suas simulações- (Malfatti et al. 2018)

Para o desenvolvimento e avaliação do modelo, divide-se o conjunto de dados em dois períodos, o primeiro é utilizado na calibração, para o ajuste da equação de regressão, e o segundo período é considerado no processo de validação, comparando o conjunto de pares previsão e observação, cuja observação não foi incluída na calibração. Tal método é usualmente aplicado no desenvolvimento de modelagem empírica, visando obter o melhor arranjo empírico e desempenho do modelo através de preditores considerados (Krauskopf Neto et al., 2007; Ratton e Guetter, 2015; Câmara et al., 2016).

A calibração e a validação do modelo hidrológico serão realizadas com os dados hidrológicos das séries históricas e os dados simulados. O coeficiente de correlação será utilizado para demonstrar a qualidade do ajuste do modelo, equação (8).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum (V_i - \bar{V})^2 \sum (Q_i - \bar{Q})^2}} \quad (8)$$

Em que:

r = coeficiente de correlação

V_i é a vazão simulada;

Q_i é a vazão observada;

\bar{V} é a média da precipitação observada;

\bar{Q} é a média da vazão observada.

O modelo será considerado válido se ele for capaz de reproduzir a quase realidade. Essa tarefa é realizada aplicando-se uma avaliação na saída do modelo, baseado em um período não considerado na calibração. Esta avaliação consiste na identificação de

possíveis limitações do modelo, que possam exigir um novo processo de ajuste e validação. No caso de modelo empírico poderia ser o aumento da série histórica, incluindo períodos mais recentes de observação, como também a inclusão de outros preditores. (Malfatti et al. 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mesmo modelo já foi aplicado no meu trabalho de conclusão de curso no ano de 2017 na bacia do Paraíba em Caraúbas para os anos de 2004 a 2012 com os meses mais chuvosos que compreendia de janeiro a junho. As cidades que continham postos pluviométricos na época dos estudos foram Camalaú, Caraúbas, Congo, Monteiro, Prata São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro e Sumé, o posto fluviométrico ficava em Camalaú. Os resultados obtidos para a bacia foram excelentes, onde as variáveis independentes explicavam 98 % da variância total, o erro médio foi de 0,233 e a variância total explicava 99,6% do sistema. As cidades que mais contribuíram para a vazão foram Camalaú, Caraúbas, Congo e Sumé, tais cidades são as mais próximas da exutória. O resultado foi tão bom que chegou a conclusão que poderia ter acontecido um sobreajustamento dos dados de vazão média mensal gerados pelo modelo. No entanto para verificação de tal afirmação seria necessário estudos adicionais, como por exemplo, uma análise de sensibilidade do modelo chuva-vazão.

Todos os resultados obtidos e discutidos nessa seção foram produzidos com a ajuda do software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), versão 20, como também toda tentativa de melhoramento das variáveis numa tentativa de se obter um melhor R^2 ajustado.

Primeiramente foram testadas todas as séries históricas no modelo, para que se pudesse obter o melhor R^2 ajustado. Na primeira tentativa usaram-se os dados como obtidos nos postos, e sem tirar nenhum posto, nesse caso o R^2 ajustado foi igual a 0,428 que não é um valor viável para a aceitação do modelo. Em seguida utilizou-se o processo chamado “*forward stepwise*”, que consiste em pôr e suprimir postos pluviométricos para verificar a influência que cada um deles apresenta na formação da vazão e em seguida analisar o comportamento do R^2 . Nessa primeira tentativa o posto que apresentou a maior influência para a produção da vazão foi o de Itaporanga e a menor influência o de Princesa Isabel.

Em seguida utilizou-se outro procedimento, o de padronizar as vazões e precipitações para buscar melhores resultados. No entanto não houve nenhuma melhora, o R^2 permaneceu quase o mesmo valor. Neste caso, o posto pluviométrico com maior influencia foi o de Piancó e o de menor influência na formação do escoamento

superficial continuou sendo de Princesa Isabel. Numa terceira tentativa foi aplicado o log nas vazões e precipitações, no entanto o resultado foi ainda pior, já que o R^2 foi igual a 0,352. Aqui o posto pluviométrico com maior influência foi o de Piancó e o com menor influência o de Conceição.

A segunda abordagem foi a de defasar a precipitação em relação a vazão, ou seja a chuva de dezembro de 1994 seria contabilizada na vazão de janeiro de 1995. O resultado do R^2 foi ainda pior, sendo igual a 0,163, sem padronização dos dados, em seguida utilizou-se o procedimento “*forward stepwise*”, porém não se obteve nenhuma melhora, o posto pluviométrico com maior influencia nessa rodada foi o de Santana dos Garrotes e o de menor influência, Princesa Isabel. Em seguida os dados foram padronizados e o resultado foi igual ao anterior, aplicou-se novamente o “*forward stepwise*” e não se obteve melhoria. Os postos pluviométricos com mais e menos importância no processo foram os mesmos do processo anterior. A última tentativa dessa abordagem foi a aplicação do log em todas as séries, no entanto o R^2 ajustado não foi satisfatório, porém melhorou um pouco, sendo igual a 0,52, Novamente foi feito o procedimento “*forward stepwise*”, sem nenhum êxito. O posto pluviométrico mais influente foi o de Itaporanga e o de menor importância o de Princesa Isabel.

A terceira abordagem foi a de defasar em dois meses a precipitação em relação a vazão, ou seja, o acumulado das chuvas de dezembro e janeiro formariam a vazão de fevereiro. Inicialmente foi aplicada essa técnica nos dados de entrada do modelo sem padronização, Como resultado, o R^2 foi ainda menos satisfatório do que o das outras tentativas, com valor igual a -0,018. O posto mais influente na formação da vazão foi o de Boa Ventura e o menos influente o de Princesa Isabel. Em seguida foi feito todo o procedimento como nas outras tentativas, porém não se obteve nenhuma melhora. Logo em seguida os dados foram padronizados e simularam-se as vazões, porém o R^2 permaneceu inalterado. Neste caso o posto pluviométrico mais influente na formação das vazões foi o de Santana dos Garrotes e o de menor influência Princesa Isabel. A última tentativa foi aplicar o log em todas as séries e o R^2 foi igual a 0,052. Aqui o posto pluviométrico mais importante na produção da vazão foi o de Itaporanga e o menor importante, Princesa Isabel.

Como nenhuma das alternativas anteriormente utilizadas produziu resultados satisfatórios, que seria algum valor próximo de 80%, utilizou o método de tentativa e

erro. Retirou alguns anos da série histórica e analisou-se o R^2 ajustado de todos os postos pluviométricos, sem nenhum procedimento “*forward stepwise*”. O resultado com uma resposta satisfatória seria escolhido para representar as vazões simuladas e em seguida aplicar-se-ia os testes para validar o modelo. Retirou-se primeiramente o ano de 2019 até chegar ao ano de 2003, já que esse foi o ano que apresentou uma resposta mais satisfatória nessa tentativa. Como pode ser visto na Tabela 5

Tabela 5: Valores do R^2 ajustado gerado pelo modelo.

Ano	Situação das séries de dados		
	Bruto	Padronizado	Log
Até 2018	0,432	0,432	0,334
Até 2017	0,481	0,444	0,336
Até 2016	0,485	0,447	0,338
Até 2015	0,446	0,446	0,360
Até 2014	0,455	0,455	0,366
Até 2013	0,463	0,463	0,375
Até 2012	0,467	0,467	0,375
Até 2011	0,460	0,460	0,552
Até 2010	0,485	0,485	0,559
Até 2009	0,491	0,491	0,605
Até 2008	0,495	0,495	0,602
Até 2007	0,510	0,510	0,588
Até 2006	0,511	0,511	0,590
Até 2005	0,525	0,525	0,597
Até 2004	0,534	0,534	0,617
Até 2003	0,616	0,616	0,636

Como o ano de 2003 foi o que apresentou a melhor resposta do R^2 ajustado, então se utilizou os dados padronizados, aplicou-se o método de “*forward stepwise*”. Inicialmente pôs-se apenas um posto pluviométrico e o posto fluviométrico, para analisar quais postos pluviométricos teriam maior ou menor influência na formação da vazão. Dessa forma, o posto pluviométrico que apresentou o melhor R^2 ajustado foi Santana dos Garrotes (I), com valor de 0,587 e o pior posto foi Manaíra (E) com 0,242, como pode ser visto na Tabela 6. Como o melhor posto pluviométrico foi o (I), foi se adicionando posto por posto, porém sempre mantendo o posto (I) e verificando-se o comportamento de R^2 ajustado, como pode ser visto na Tabela 5. À medida que se adicionava postos, o valor do R^2 ajustado melhorava ou piorava. Quando se incluiu todos os postos pluviométricos obteve-se um R^2 ajustado igual a 0,616. Pode ser observado que o melhor valor foi obtido na quarta tentativa, com os postos I,G,B,A com

um valor de R^2 ajustado = 0,641. As combinações com os piores valores de R^2 foram as da segunda tentativa em que as combinações I,C; I,E; I,F e I,G apresentaram valores iguais a 0,579. Como era de se esperar a melhor correlação chuva-vazão foi obtida pelo posto I, com um valor de R^2 ajustado = 0,771.

Tabela 6: Valores dos R^2 ajustados à medida que se adicionou postos pluviométricos com dados padronizados até o ano de 2003.

1		2		3		4	
Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus
A	0,507	I,A	0,59	I,G,A	0,63	I,G,B,A	0,641
B	0,258	I,B	0,584	I,G,B	0,637	I,G,B,C	0,630
C	0,343	I,C	0,579	I,G,C	0,63	I,G,B,D	0,630
D	0,415	I,D	0,582	I,G,D	0,624	I,G,B,E	0,632
E	0,242	I,E	0,579	I,G,E	0,624	I,G,B,H	0,630
F	0,417	I,F	0,579	I,G,F	0,626	I,G,B,F	0,633
G	0,511	I,G	0,631	I,G,H	0,631		
H	0,29	I,H	0,579				
I	0,587						
5		6		7		8	
Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus
I,G,B,A,C	0,634	I,G,B,A ,F,C	0,631	I,G,B,A,F ,H,C	0,629	I,G,B,A,F, H,DC	0,622
I,G,B,A,D	0,635	I,G,B,A ,F,D	0,635	I,G,B,A,F ,H,D	0,630	I,G,B,A,F, H,D,I	0,624
I,G,B,A,E	0,634	I,G,B,A ,F,E	0,631	I,G,B,A,F ,H,E	0,630		
I,G,B,A,F	0,639	I,G,B,A ,F,H	0,636				
I,G,B,A,H	0,639						
9							
Postos	R ² Ajus						
I,G,B,A,F,H,D ,I,C	0,616						

A simulação das vazões foi efetuada utilizando-se a equação (2) com todos os postos pluviométricos incluídos na modelagem. A Tabela 7 exibe os valores dos coeficientes $b_0, b_1, b_2, \dots, b_9$ da equação de regressão.

Tabela 7: Valores dos coeficientes de regressão do modelo com todos os postos pluviométricos.

Coeficientes de regressão									
b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
0,00000189	0,368	-0,132	-0,037	-0,079	0,080	-0,211	0,0409	-0,124	0,557

A Tabela 8 exibe os valores das vazões padronizadas observadas e simuladas com base na equação de regressão proposta. Destaca-se em vermelho os sinais trocados do ajuste do modelo, indicando falha no processo para gerar valores de vazões mensais para a bacia em estudo.

Tabela 8: Valores das vazões simulada e observada padronizada com todos os postos.

Vazões Padronizadas					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	-0,468	-1,005	Mar/99	0,559	0,268
Jan/95	-0,437	-0,530	Abr/99	-0,488	-0,845
Fev/95	-0,302	-0,439	Mai/99	-0,461	0,407
Mar/95	0,220	0,219	Dez/99	-0,472	-0,257
Abr/95	3,635	1,982	Jan/00	-0,175	0,302
Mai/95	0,321	0,953	Fev/00	0,173	0,743
Dez/95	-0,505	-0,884	Mar/00	0,159	0,519
Jan/96	-0,497	-0,855	Abr/00	3,198	1,558
Fev/96	-0,285	0,450	Mai/00	-0,294	-0,691
Mar/96	-0,031	0,815	Dez/00	-0,496	-0,483
Abr/96	0,692	0,817	Jan/01	-0,513	-0,711
Mai/96	0,520	0,471	Fev/01	-0,233	-0,152
Dez/96	-0,499	-1,079	Mar/01	-0,080	0,311
Jan/97	-0,389	0,213	Abr/01	-0,448	-0,534
Fev/97	-0,413	-0,749	Mai/01	-0,507	-0,941
Mar/97	0,660	1,183	Dez/01	-0,474	-0,296
Abr/97	0,238	-0,140	Jan/02	4,587	3,166
Mai/97	-0,138	-0,133	Fev/02	0,017	-0,107
Dez/97	-0,471	-0,233	Mar/02	-0,287	0,223
Jan/98	-0,415	-0,317	Abr/02	-0,346	-0,765
Fev/98	-0,501	-0,503	Mai/02	-0,433	0,183
Mar/98	-0,470	-0,533	Dez/02	-0,511	-0,550
Abr/98	-0,441	0,211	Jan/03	0,068	0,703
Mai/98	-0,509	-0,887	Fev/03	-0,401	0,551
Dez/98	-0,510	-0,839	Mar/03	0,213	1,068
Jan/99	-0,476	-0,575	Abr/03	-0,030	-0,068
Fev/99	-0,428	-0,612	Mai/03	-0,427	-0,601

Com base nas vazões simulada e observada, calcularam-se os índices do modelo proposto. A Tabela 9 exibe os valores desses índices. Como o NSE se aproxima de um, então a eficiência do modelo pode ser considerada boa. Já o PBIAS apresenta um valor absurdamente alto, portanto não pode ser avaliado. Esse alto valor do PBIAS é atribuído a troca de sinais entre os valores das vazões simulada e observada (esses valores estão marcado de vermelho, totalizando 11 meses com troca de sinal). O RMSE e o CNS podem ser considerados regulares, já que perfeita a correlação seria 1,0. Já o D% apresentou um valor absurdamente alto, devido aos mesmos motivos do erro do PBIAS. O R^2 apresentou um valor absurdamente baixo.

Tabela 9: Valores dos índices calculados para o modelo proposto.

Índices do modelo					
NSE	PBIAS	RMSE	CNS	D%	R^2
0,68	2,92E+12	0,56	0,68	2,92E+12	9,8863E-06

A seguir foram simuladas as vazões padronizadas com base quarta tentativa de modelagem, utilizando os postos pluviométricos da combinação I, G, B, A. A Tabela 10 exibe os coeficientes de regressão da nova simulação das vazões. Com os valores simulados e observados calcularam-se os índices. O NSE foi considerado insatisfatório já que o seu valor foi menor do que 0,50. O PBIAS apresentou um valor muito alto, devido ao mesmo problema ocorrido na simulação anterior. O RMSE apontou uma correlação boa, já o CNS foi inferior a 0,5, portanto, o modelo não pode ser considerado para simulação das vazões. O D% apresentou um valor absurdo, devido ao mesmo problema do PBIAS. O R^2 apresentou um valor muito baixo, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 10: Valores dos coeficientes, gerado pelo modelo com os postos I,G,B,A.

Coeficientes de regressão					
b0	b1	b2	b3	b4	b5
0,00004065	0,210	-0,204	0,349	-0,079	0,483

Tabela 11: Valores dos índices calculados para os postos pluviométricos I, G, B, A.

Índices do modelo					
NSE	PBIAS	RMSE	CNS	D%	R ²
0,146524	8,41E+10	0,915243	0,146524	-98,5956	0,002887454

A Tabela 12 exibe os valores padronizados de vazões observada e simulada com a combinação de postos pluviométricos I, G, B, A.

Tabela 12: Valores das vazões padronizadas simulada e observada com os postos I,G,B,A.

Vazões Padronizadas					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	-0,468	-0,03	Mar/99	0,559	0,00
Jan/95	-0,437	-0,01	Abr/99	-0,488	-0,08
Fev/95	-0,302	-0,13	Mai/99	-0,461	0,08
Mar/95	0,220	-0,21	Dez/99	-0,472	-0,07
Abr/95	3,635	0,10	Jan/00	-0,175	-0,01
Mai/95	0,321	0,22	Fev/00	0,173	0,12
Dez/95	-0,505	-0,09	Mar/00	0,159	0,15
Jan/96	-0,497	-0,15	Abr/00	3,198	0,14
Fev/96	-0,285	-0,03	Mai/00	-0,294	-0,08
Mar/96	-0,031	0,07	Dez/00	-0,496	-0,12
Abr/96	0,692	0,10	Jan/01	-0,513	-0,04
Mai/96	0,520	0,01	Fev/01	-0,233	-0,05
Dez/96	-0,499	-0,10	Mar/01	-0,080	0,02
Jan/97	-0,389	0,12	Abr/01	-0,448	-0,01
Fev/97	-0,413	-0,11	Mai/01	-0,507	-0,10
Mar/97	0,660	0,18	Dez/01	-0,474	0,05
Abr/97	0,238	-0,02	Jan/02	4,587	0,54
Mai/97	-0,138	0,01	Fev/02	0,017	-0,02
Dez/97	-0,471	-0,05	Mar/02	-0,287	-0,04
Jan/98	-0,415	-0,05	Abr/02	-0,346	-0,07
Fev/98	-0,501	0,03	Mai/02	-0,433	0,05
Mar/98	-0,470	-0,08	Dez/02	-0,511	-0,08
Abr/98	-0,441	-0,02	Jan/03	0,068	0,08
Mai/98	-0,509	-0,09	Fev/03	-0,401	0,04
Dez/98	-0,510	-0,12	Mar/03	0,213	0,07
Jan/99	-0,476	-0,03	Abr/03	-0,030	0,07
Fev/99	-0,428	-0,12	Mai/03	-0,427	-0,06

A Tabela 13 apresenta os valores do R² ajustado, com aplicação do ln aos dados. Percebe-se que o R² ajustado aumenta e na sexta tentativa atinge o seu maior valor

(0,67) com a combinação de postos pluviométricos D, I, B, E, C, A. Logo após dá início a uma queda e atinge seu menor valor (0,614) com todos os postos. A partir dos coeficientes de regressão dessa tentativa foram simuladas as vazões através da equação (2). Nota-se que os valores negativos e muito baixos das vazões observadas provocou erros ao modelo. Pode ser notado na Tabela 14 que há valores faltosos para a vazão simulada. O procedimento para simular as vazões foi efetuado tanto para todos os postos como para aquela combinação de postos pluviométricos que apresentou o melhor R^2 ajustado, como visto na Tabela 15. Nessas duas simulações não foi possível calcular os índices para nenhum dos dois casos, como feito nas outras simulações.

Os mesmos procedimentos foram efetuados para o log. Também nessa simulação à medida que se adicionava os postos pluviométricos o R^2 ajustado melhorava até atingir o valor máximo na sexta tentativa, quando se obteve um valor igual a 0,749, com a combinação de postos D, E, A, F, B, C. a partir daí o valor foi diminuindo até atingir o valor de 0,658 com todos os postos, como pode ser visto na Tabela 16. A partir do melhor resultado para o R^2 ajustado as vazões foram simuladas para ambos os casos. Porém o mesmo erro que ocorreu com o ln, também ocorreu com o log. Os resultados simulados podem ser visto nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 13: valores dos R^2 ajustado no modelo não linear aplicado o ln, a medida que ia adicionando postos.

1		2		3		4	
Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus
A	0,546	D,A	0,612	D,I,A	0,638	D,I,B,A	0,663
B	0,475	D,B	0,662	D,I,B	0,661	D,I,B,C	0,665
C	0,449	D,C	0,608	D,I,C	0,635	D,I,B,E	0,666
D	0,602	D,E	0,614	D,I,E	0,637	D,I,B,F	0,617
E	0,31	D,F	0,596	D,I,F	0,586	D,I,B,G	0,596
F	0,449	D,G	0,571	D,I,G	0,595	D,I,B,H	0,618
G	0,49	D,H	0,576				
H	0,314	D,I	0,635				
I	0,545						
5		6		7		8	
Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus	Postos	R^2 Ajus
D,I,B,E,A	0,667	D,I,B,E,C ,A	0,67	D,I,B,E, C,A,F	0,626	D,I,B,,E,C, A,HF	0,631
D,I,B,E,C	0,669	D,I,B,E,C F	0,625	D,I,B,E, C,A,G	0,607	D,I,B,E,C, A,HG	0,611
D,I,B,E,F	0,622	D,I,B,E,C ,G	0,6	D,I,B,E, C,A,H	0,628		
D,I,B,E,G	0,598	D,I,B,E,C ,G,H	0,627				
D,I,B,E,H	0,623						
9							
Postos	R^2 Ajus						
D,I,B,E,C,A, H,F,G	0,614						

Tabela 14: Valores das vazões simulada e observada aplicando Ln em todos os dados dos postos pluviométricos.

Vazões					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	0,1	-	Mar/99	3,3	2,64
Jan/95	0,7	0,31	Abr/99	-0,4	-1,72
Fev/95	1,7	1,6	Mai/99	0,3	2,17
Mar/95	3,0	2,7	Dez/99	0,1	1,1
Abr/95	4,7	3,59	Jan/00	2,2	2,27
Mai/95	3,1	2,76	Fev/00	2,9	2,8
Dez/95	-1,6	-	Mar/00	2,9	2,36
Jan/96	-0,9	0,29	Abr/00	4,6	3,35
Fev/96	1,8	2,06	Mai/00	1,7	-0,27
Mar/96	2,5	3	Dez/00	-0,9	1,08
Abr/96	3,4	2,92	Jan/01	-2,3	-
Mai/96	3,3	2,46	Fev/01	2,0	1,54
Dez/96	-1,0	-	Mar/01	2,4	2,86
Jan/97	1,2	1,97	Abr/01	0,5	0,24
Fev/97	1,0	0,47	Mai/01	-1,9	-
Mar/97	3,4	3,24	Dez/01	0,0	1,38
Abr/97	3,0	1,88	Jan/02	4,9	4,01
Mai/97	2,3	1,57	Fev/02	2,6	1,31
Dez/97	0,1	0,13	Mar/02	1,8	2,61
Jan/98	0,9	1,31	Abr/02	1,5	0,28
Fev/98	-1,2	0,22	Mai/02	0,7	1,84
Mar/98	0,1	1,38	Dez/02	-3,4	-
Abr/98	0,6	1,72	Jan/03	2,7	2,6
Mai/98	-2,2	-	Fev/03	1,1	2,49
Dez/98	-2,7	-	Mar/03	2,9	2,85
Jan/99	0,0	0,22	Abr/03	2,5	1,65
Fev/99	0,1	0,8	Mai/03	0,8	0,55

Tabela 15: Valores das vazões simulada e observada com base na combinação de postos pluviométricos D, I, B, E, C, A e aplicando o Ln aos dados.

Vazões					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	0,1	-	Mar/99	3,3	3,24
Jan/95	0,7	0,85	Abr/99	-0,4	-1,4
Fev/95	1,7	1,72	Mai/99	0,3	1,85
Mar/95	3,0	3,02	Dez/99	0,1	0,95
Abr/95	4,7	3,59	Jan/00	2,2	2,06
Mai/95	3,1	2,3	Fev/00	2,9	2,71
Dez/95	-1,6	-	Mar/00	2,9	2,02
Jan/96	-0,9	0,81	Abr/00	4,6	3,48
Fev/96	1,8	1,92	Mai/00	1,7	-0,76
Mar/96	2,5	3,12	Dez/00	-0,9	1,42
Abr/96	3,4	2,86	Jan/01	-2,3	-
Mai/96	3,3	1,84	Fev/01	2,0	1,82
Dez/96	-1,0	-	Mar/01	2,4	2,89
Jan/97	1,2	1,55	Abr/01	0,5	-0,93
Fev/97	1,0	0,98	Mai/01	-1,9	-
Mar/97	3,4	3,38	Dez/01	0,0	0,97
Abr/97	3,0	2,13	Jan/02	4,9	3,58
Mai/97	2,3	1,49	Fev/02	2,6	1,01
Dez/97	0,1	0,99	Mar/02	1,8	2,04
Jan/98	0,9	1,77	Abr/02	1,5	0,03
Fev/98	-1,2	-0,25	Mai/02	0,7	1,42
Mar/98	0,1	1,8	Dez/02	-3,4	-2,35
Abr/98	0,6	1,83	Jan/03	2,7	2,86
Mai/98	-2,2	-	Fev/03	1,1	2,31
Dez/98	-2,7	-2,49	Mar/03	2,9	2,87
Jan/99	0,0	0,37	Abr/03	2,5	1,52
Fev/99	0,8	1,12	Mai/03	0,8	0,2

Tabela 16: Valores dos R² ajustados ao modelo não linear e aplicando o log aos dados pluviométricos.

1		2		3		4	
Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus
A	0,522	D,A	0,611	D,E,A	0,721	D,E,A,B	0,723
B	0,476	D,B	0,662	D,E,B	0,707	D,E,A,C	0,722
C	0,442	D,C	0,609	D,E,C	0,695	D,E,A,F	0,733
D	0,608	D,E	0,693	D,E,F	0,701	D,E,A,G	0,693
E	0,521	D,F	0,616	D,E,G	0,671	D,E,A,H	0,67
F	0,307	D,G	0,594	D,E,H	0,662	D,E,A,I	0,685
G	0,456	D,H	0,571				
H	0,487	D,I	0,634				
I	0,551						
5		6		7		8	
Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus	Postos	R ² Ajus
D,E,A,F,B	0,74	D,E,A,F ,B,C	0,749	D,E,A,F,B ,C,G	0,725	D,E,A,F,B, C,G,H	0,701
D,E,A,F,C	0,729	D,E,A,F ,B,G	0,717	D,E,A,F,B ,C,H	0,7	D,E,A,F,B, C,G,I	0,683
D,E,A,F,G	0,703	D,E,A,F ,B,H	0,69	D,E,A,F,B ,C,I	0,72		
D,E,A,F,H	0,689	D,E,A,F ,B,I	0,709				
D,E,A,F,I	0,698						
9							
Postos	R ² Ajus						
D,E,A,F,B,C, G,H,I	0,658						

Tabela 17: Valores das vazões simulada e observada aplicando o Log à todos os postos pluviométricos.

Vazões					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	0,1	-	Mar/99	3,3	1,36
Jan/95	0,7	0,43	Abr/99	-0,4	-0,45
Fev/95	1,7	0,75	Mai/99	0,3	0,97
Mar/95	3,0	0,83	Dez/99	0,1	0,43
Abr/95	4,7	1,61	Jan/00	2,2	0,55
Mai/95	3,1	1,14	Fev/00	2,9	1,29
Dez/95	-1,6	-	Mar/00	2,9	1,12
Jan/96	-0,9	0,16	Abr/00	4,6	1,31
Fev/96	1,8	0,75	Mai/00	1,7	-0,01
Mar/96	2,5	1,56	Dez/00	-0,9	0,16
Abr/96	3,4	1,11	Jan/01	-2,3	-
Mai/96	3,3	1,01	Fev/01	2,0	0,85
Dez/96	-1,0	-	Mar/01	2,4	1,38
Jan/97	1,2	0,86	Abr/01	0,5	0,21
Fev/97	1,0	0,2	Mai/01	-1,9	-
Mar/97	3,4	1,25	Dez/01	0,0	0,72
Abr/97	3,0	0,86	Jan/02	4,9	1,93
Mai/97	2,3	0,83	Fev/02	2,6	0,42
Dez/97	0,1	0,03	Mar/02	1,8	1,14
Jan/98	0,9	0,31	Abr/02	1,5	0,35
Fev/98	-1,2	-0,31	Mai/02	0,7	0,49
Mar/98	0,1	0,55	Dez/02	-3,4	-
Abr/98	0,6	0,74	Jan/03	2,7	1,46
Mai/98	-2,2	-	Fev/03	1,1	1,01
Dez/98	-2,7	-	Mar/03	2,9	1,28
Jan/99	0,0	-0,14	Abr/03	2,5	0,95
Fev/99	0,8	0,11	Mai/03	0,8	0,51

Tabela 18: Valores das vazões simulada e observada aplicando o Log aos postos pluviométricos da combinação D, E, A, F, B, C.

Vazões					
Período	Observada	Simulada	Período	Observada	Simulada
Dez/94	0,1	0,41	Mar/99	3,3	1,57
Jan/95	0,7	0,65	Abr/99	-0,4	-0,26
Fev/95	1,7	0,89	Mai/99	0,3	0,79
Mar/95	3,0	1,02	Dez/99	0,1	0,52
Abr/95	4,7	1,62	Jan/00	2,2	0,53
Mai/95	3,1	0,91	Fev/00	2,9	1,21
Dez/95	-1,6	-0,56	Mar/00	2,9	0,94
Jan/96	-0,9	0,37	Abr/00	4,6	1,35
Fev/96	1,8	0,7	Mai/00	1,7	-0,11
Mar/96	2,5	1,57	Dez/00	-0,9	0,33
Abr/96	3,4	1,03	Jan/01	-2,3	-0,75
Mai/96	3,3	0,8	Fev/01	2,0	0,9
Dez/96	-1,0	-	Mar/01	2,4	1,37
Jan/97	1,2	0,64	Abr/01	0,5	-0,27
Fev/97	1,0	0,41	Mai/01	-1,9	-
Mar/97	3,4	1,26	Dez/01	0,0	0,48
Abr/97	3,0	0,85	Jan/02	4,9	1,73
Mai/97	2,3	0,78	Fev/02	2,6	0,29
Dez/97	0,1	0,41	Mar/02	1,8	0,99
Jan/98	0,9	0,49	Abr/02	1,5	0,23
Fev/98	-1,2	-0,58	Mai/02	0,7	0,32
Mar/98	0,1	0,69	Dez/02	-3,4	-1,32
Abr/98	0,6	0,74	Jan/03	2,7	1,56
Mai/98	-2,2	-	Fev/03	1,1	0,92
Dez/98	-2,7	-1,34	Mar/03	2,9	1,3
Jan/99	0,0	-0,09	Abr/03	2,5	0,8
Fev/99	0,8	0,34	Mai/03	0,8	0,43

5 CONCLUSÃO

- 1) De modo geral, as várias tentativas de ajuste da variável precipitação pluvial, utilizando o modelo empírico Linear Multivariado para produzir vazão mensal apresentaram valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2) muito baixo, quando foram utilizadas todas as séries históricas até o ano de 2019. A adição de anos e postos pluviométricos na modelagem parecia que haveria o ajustamento, mas logo depois havia a degeneração dos resultados e produção de vazões negativas. As tentativas de aplicar logaritmo na base dez, logaritmo neperiano e padronização dos dados de entrada do modelo também não apresentaram bons resultados;
- 2) Outra tentativa foi a de entrar os dados no modelo com postos pluviométricos previamente escolhidos com base nos coeficientes de correlação entre a variável vazão e a variável precipitação de cada um dos postos pluviométricos. Os resultados também não foram satisfatórios, haja vista o baixo valor do R^2 ajustado;
- 3) Foi cogitado que um Modelo não Linear poderia melhorar essa relação entre chuva e vazão, mas não houve êxito na modelagem. Também foram efetuadas defasagens entre as duas variáveis de estudo, outra vez sem êxito;

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se afirmar que os modelos empíricos de regressão chuva-vazão, Linear Multivariado ou não Linear não se ajustam aos dados da bacia hidrográfica do rio Piancó, pelo menos para o período de anos aqui utilizado. Sugere-se que em novas pesquisas se utilizem modelos como Redes Neurais Artificiais ou Regressão por Análise de Componentes Principais.

BIBLIOGRAFIA

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em <<http://www.aesa.pb.gov.br>>. Acesso em junho 2019.

ANA. Agência Nacional das Águas. Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em junho 2019.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. **A comprehensive surface groundwater flow model**. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 142, n. 1-4, p.47-69, 1993.

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S. et al. **Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model Development**. Journal of the American Water Research Association, Jawa, v. 34, n. 1, p.73-89, 1998.

ARNOLD, L. G.; FOHRER, N. **SWAT. 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling**. Hydrological Processes, Chi Chester, v. 19, n. 3, p.563- 572, 2005.

BRONSTERT, A.; PLATE, E.J. **Modelling of runoff generation and soil moisture Dynamics for hill slopes and micro-catchments**. Journal of Hydrology, 198:177-195 1997.

CHRISOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999, 236 p.

COLLISCHONN, W. et al. **Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: Previsão climática-hidrológica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 61-72, 2005.

CUNHA, L. K. DA. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 239 p.

FAYAL, M. A. DE A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 158 p.

FERREIRA, G.A; MELLO, S.G.N. **Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influencia dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região**. Revista Brasileira de Climatologia, Vol. 1, No 1, 2005.

GIMENO, L. et al. **Oceanic sand terrestrial sources of continental precipitation**. 2012. Reviews of Geophysics, 50:RG4003.

LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, 174 p.

MALFATTI, L.G.M.; CARDOSO, O. A.; HAMBÚRGUER, S.A. **Modelo Empírico Linear para Previsão de Vazão de Rios na Usina Hidrelétrica de Itaipu – Bacia do Rio Paraná**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 2, p. 257-268, 2018.

MARINHO FILHO, M. G. et al. **Modelos Hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades**. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47, ISSN 1981-8858, 2012.

MARWELL, P. F. **Modelo hidrológico mensal para a região semiárida do Nordeste Brasileiro**. 1985. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 136 p.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

MORAES, J. M. **Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 8(1):61-70/2003.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 81p.

MORIASI, D. N. et al. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Transactions of American society of Agricultural and biological Engineers, v.50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASCIMENTO JUNIOR, CARLOS N. DE S. **Transformação chuva/vazão na bacia hidrográfica do rio Espinharas - aplicação do modelo hidrológico distribuído açumod**. 2004. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009**. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2011a. 647 p.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: user's manual version 2009**. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2011b. 437 p.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2019

ROCHA, A. T. **Modelagem chuva-vazão espaço-temporal na bacia hidrográfica do rio Paraíba em Caraúbas – PB**. 2017. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Campina Grande,

SALAS, J. D. et al. **Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River**. Colorado. J. Water Resources Planning Management - ASCE 131 (5), 2005. p. 383 – 393.

SILVA, L. P. E. **Modelagem Geoprocessamento na identificação e áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá – João Pessoa.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal da Paraíba/CT, 114 p.

SOUSA, W.S. **Rede neural aplicada à previsão de vazões médias mensais da bacia hidrográfica do rio Piancó.** 2008. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 78 p.

SOUSA, C.A. **Fontes de umidade continental e oceânica e impacto na disponibilidade de umidade para a atmosfera na América do Sul.** 2015. Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Amazonas, 80p.

SOUZA, R. M. et al. **O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.** In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2009, Campo Grande, Anais. Porto Alegre: ABRH, 2009.

SPRUIILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J.L. **Simulation of daily and monthly stream discharge form small watersheds using the SWAT model.** 2000. Transaction of the ASAE, 43(6):1431-1439.

TUCCI, C. E. M. **Simulação no gerenciamento de recursos hídricos.** In: BARTH, F.T. et al. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987. Cap3.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

TRENBERTH, K. E., T., F. J., E MACKARO, J. **Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses.** 2011. J. Clim. , 24:4907–4924.

UVO, C.R. B. e R. BERNDTSSON. **Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil.** J. Geoph. Res., v. 101, n. D2, 4221-4233, 1996.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia.** Brasília: INMET, Gráfica e editora Pax, 2001.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J. **Understanding the complex impacts of drought:** A key to improving drought mitigation and preparedness. Water Resources Management, 21 (5), 2007. p.763-774.

APÊNDICE A - DADOS DE VAZÃO MÉDIA MENSAL E PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL

Tabela A1. Dados de vazão mensal Q (m³/s), da estação fluviométrica de Piancó, e dados de precipitação mensal, P (mm), das estações pluviométricas que compõe a bacia o rio Piancó, com o período mais chuvoso de Dezembro a Maio

Q(M3/S)			P(mm)							
	Período	Vazão	Boa Ventura	Conceição	Ibiara	Manaíra	Nova Olinda	Piancó	Princesa Isabel	Santana.D.G
1	Dez/94	1,16	105,4	62,0	67,6	95,8	158,4	33,0	89,1	0,0
2	Jan/95	1,98	137,7	65,7	59,2	38,9	64,5	35,0	45,9	25,0
3	Fev/95	5,49	143,4	222,4	153,9	120,2	144,6	61,0	86,1	82,6
4	Mar/95	19,11	158,3	348,5	278,2	327,6	233,7	118,0	174,5	217,8
5	Abr/95	108,12	306,9	213,4	266,6	120,4	292,3	235,0	98,8	347,6
6	Mai/95	21,74	129,9	143,1	86,0	99,2	137,6	364,0	140,9	140,6
7	Dez/95	0,20	13,0	14,1	3,1	21,0	3,6	0,0	16,3	0,0
8	Jan/96	0,40	22,2	139,9	114,7	102,4	80,0	56,7	63,8	41,5
9	Fev/96	5,94	176,9	104,6	54,6	203,4	150,5	60,3	83,4	152,8
10	Mar/96	12,56	134,0	241,6	289,0	130,9	178,5	322,1	177,4	207,5
11	Abr/96	31,40	133,3	141,2	58,6	109,7	105,7	262,5	238,1	193,4
12	Mai/96	26,93	117,4	74,6	107,4	32,5	177,6	126,0	38,8	174,2
13	Dez/96	0,37	0,0	54,2	49,8	62,2	52,8	36,5	70,0	0,5
14	Jan/97	3,22	128,6	90,8	127,0	220,4	169,1	206,5	95,2	82,1
15	Fev/97	2,59	22,0	90,8	75,0	28,0	76,4	51,0	39,4	50,2
16	Mar/97	30,58	234,8	223,8	300,6	135,0	202,1	347,1	235,4	225,5
17	Abr/97	19,57	101,6	68,8	60,8	186,9	130,2	92,5	269,8	143,6
18	Mai/97	9,78	147,4	62,8	97,4	43,8	120,1	69,4	110,9	94,0
19	Dez/97	1,10	98,7	16,4	69,0	30,8	79,5	6,4	71,1	107,1
20	Jan/98	2,56	87,7	78,2	109,7	80,5	61,0	63,0	78,2	80,9
21	Fev/98	0,30	39,2	27,0	27,0	17,8	26,3	111,4	66,0	18,8

Continua

Continuação

22	Mar/98	1,12	73,9	127,8	100,7	66,3	90,9	82,7	115,8	74,8
23	Abr/98	1,88	132,1	51,4	38,4	58,1	70,4	51,5	90,2	136,1
24	Mai/98	0,11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	Dez/98	0,07	6,2	39,0	13,2	10,0	0,0	0,0	0,0	13,0
26	Jan/99	0,96	72,7	53,9	116,6	185,3	62,6	54,2	76,4	26,3
27	Fev/99	2,21	79,4	134,2	146,2	104,7	81,9	38,0	52,4	54,2
28	Mar/99	27,94	310,9	295,0	182,8	344,9	287,7	146,5	217,4	153,5
29	Abr/99	0,64	31,2	36,2	35,6	38,0	16,2	17,1	38,0	6,0
30	Mai/99	1,35	126,7	64,5	79,6	111,2	110,5	160,0	79,1	122,0
31	Dez/99	1,06	74,3	76,9	89,3	145,4	30,9	49,9	91,1	73,2
32	Jan/00	8,80	95,7	149,4	186,0	128,4	84,3	165,1	34,2	119,2
33	Fev/00	17,87	205,4	152,3	184,7	161,9	224,9	228,1	161,7	182,0
34	Mar/00	17,51	188,7	105,5	141,4	118,4	155,1	208,9	82,6	105,0
35	Abr/00	96,73	291,9	212,0	298,4	265,2	213,1	258,4	189,6	263,4
36	Mai/00	5,70	27,4	40,5	29,2	42,6	32,6	27,0	21,4	25,0
37	Dez/00	0,43	46,1	106,0	102,0	103,9	83,2	48,0	97,1	92,0
38	Jan/01	0,00	33,6	41,0	49,8	13,6	22,5	56,0	7,1	0,0
39	Fev/01	7,29	83,6	70,8	45,0	138,6	72,1	64,3	123,8	106,0
40	Mar/01	11,29	202,1	239,6	328,2	160,6	328,2	215,8	151,2	185,8
41	39	1,68	29,4	43,2	26,0	45,3	42,3	97,5	48,4	20,8
42	Mai/01	0,15	19,0	40,6	42,4	35,2	0,0	6,0	60,0	2,0
43	Dez/01	1,01	123,2	55,4	90,6	100,2	162,4	109,9	86,2	57,5
44	Jan/02	132,94	396,5	257,6	287,8	344,3	387,9	634,0	284,5	327,0

Continua

Continuação

45	Fev/02	13,81	62,0	34,4	97,2	344,3	387,9	634,0	61,9	96,2
46	Mar/02	5,87	192,1	234,2	174,0	72,0	57,7	74,4	159,7	153,4
47	Abr/02	4,35	26,0	84,8	40,0	96,7	201,4	148,3	82,9	27,0
48	Mai/02	2,09	131,8	60,4	71,8	58,8	68,2	81,3	52,7	93,5
49	Dez/02	0,04	52,1	21,8	25,2	62,5	84,5	113,2	115,5	56,4
50	Jan/03	15,14	222,4	172,2	231,8	158,0	54,2	0,0	114,7	156,0
51	Fev/03	2,92	146,0	147,9	144,6	255,8	155,1	189,6	95,3	154,8
52	Mar/03	18,92	351,6	156,2	215,6	202,4	177,6	187,4	168,0	241,8
53	Abr/03	12,59	60,9	86,2	95,6	168,2	308,7	97,0	54,5	69,5
54	Mai/03	2,24	24,4	27,6	12,6	58,8	114,8	204,9	57,7	35,5
55	Dez/03	0,57	30,8	11,1	8,0	11,2	7,0	45,9	19,0	25,0
56	Jan/04	204,45	391,2	511,4	420,1	13,2	19,6	23,0	462,5	422,1
57	Fev/04	261,37	257,6	272,7	367,3	451,2	439,9	489,7	229,6	161,9
58	Mar/04	36,56	143,6	50,7	117,3	179,5	213,8	321,2	108,7	45,2
59	Abr/04	6,78	7,7	26,4	39,8	86,6	119,4	104,0	91,2	47,3
60	Mai/04	30,74	156,7	73,4	78,2	55,8	73,4	19,0	128,0	256,4
61	Dez/04	3,31	78,0	47,6	20,5	54,6	195,2	118,0	18,5	16,1
62	Jan/05	6,76	182,9	112,2	118,0	48,6	20,8	37,0	95,5	34,3
63	Fev/05	5,49	61,6	22,3	53,0	28,2	66,9	37,0	67,2	29,8
63	Fev/05	5,49	61,6	22,3	53,0	89,8	58,1	111,3	243,9	238,9
64	Mar/05	33,44	432,4	249,8	187,2	158,2	405,7	267,5	86,4	21,1
65	Abr/05	20,85	41,3	44,2	55,2	52,2	27,7	69,8	64,5	78,9
66	Mai/05	9,13	47,9	118,4	49,4	38,8	51,2	21,8	19,0	25,0

Continua

Continuação

67	Dez/05	1,97	53,5	87,3	38,0	102,4	73,7	65,3	53,2	38,6
68	Jan/06	0,47	0,0	11,4	14,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0
69	Fev/06	7,60	264,2	203,1	122,8	136,6	211,9	283,8	154,5	125,7
70	Mar/06	65,63	385,7	321,5	359,6	250,6	428,8	268,8	277,8	345,9
71	Abr/06	90,30	207,6	218,0	130,5	187,4	319,4	277,0	255,0	125,3
72	Mai/06	28,21	155,8	29,9	45,2	72,2	155,6	88,3	97,4	21,2
73	Dez/06	2,49	98,0	39,7	39,2	2,2	18,4	25,8	40,4	38,6
74	Jan/07	5,35	55,5	60,5	79,6	10,2	53,6	61,2	126,8	115,6
75	Fev/07	23,33	330,2	271,9	256,8	290,4	330,9	223,5	205,2	125,7
76	Mar/07	9,57	62,4	90,6	71,0	197,0	117,6	136,1	144,6	194,2
77	Abr/07	2,76	66,8	53,3	70,2	70,6	103,2	111,1	139,4	125,3
78	Mai/07	1,81	37,0	56,0	33,0	80,0	38,8	70,3	108,3	78,9
79	Dez/07	0,32	27,0	10,6	21,0	18,0	6,2	0,0	0,3	8,8
80	Jan/08	2,84	330,4	126,7	64,1	87,1	148,0	131,4	60,8	69,8
81	Fev/08	20,50	226,4	211,7	176,8	118,8	127,8	167,3	156,5	235,8
82	Mar/08	157,35	518,5	282,9	399,0	389,2	615,8	470,3	387,0	545,5
83	Abr/08	212,93	299,1	180,4	181,0	212,6	161,9	168,5	142,3	257,4
84	Mai/08	88,10	148,2	80,2	105,5	83,1	94,8	182,4	110,8	130,6
85	Dez/08	1,24	0,0	4,1	0,0	64,6	22,2	53,6	16,3	5,5
86	Jan/09	3,81	136,7	146,7	166,4	142,1	204,6	84,8	108,9	144,2
87	Fev/09	13,32	243,6	152,2	74,2	166,6	253,3	109,9	136,6	232,7
88	Mar/09	8,15	129,4	122,3	112,2	147,6	178,6	88,3	172,1	191,4
89	Abr/09	32,70	149,4	217,2	196,9	245,5	232,6	379,5	195,9	202,5

Continua

Continuação

90	Mai/09	129,99	202,8	256,9	213,1	171,5	249,1	294,9	200,6	170,9
91	Dez/09	0,79	33,0	19,6	33,2	54,9	69,6	64,4	82,4	97,7
92	Jan/10	3,04	132,9	106,7	235,8	156,1	93,0	57,1	110,9	76,5
93	Fev/10	2,55	27,6	114,5	43,2	36,6	46,8	34,5	35,1	29,7
94	Mar/10	3,14	96,2	61,5	14,5	46,6	44,4	36,8	105,6	74,2
95	Abr/10	6,29	91,9	181,3	90,0	96,0	97,0	128,7	173,2	153,1
96	Mai/10	3,35	15,1	17,9	2,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
97	Dez/10	3,52	136,5	153,4	200,4	92,1	160,0	92,6	43,7	93,9
98	Jan/11	5,85	178,5	123,0	256,3	220,4	247,2	107,3	165,5	203,3
99	Fev/11	21,74	193,9	178,1	216,1	268,5	323,2	156,6	206,4	207,5
100	Mar/11	14,37	68,6	76,3	51,3	162,5	64,4	84,1	132,2	80,5
101	Abr/11	1,66	204,7	106,0	142,6	151,8	91,0	212,3	198,0	132,2
102	Mai/11	3,74	134,0	52,7	61,6	105,3	93,5	204,2	120,1	186,9
103	Dez/11	0,00	15,3	3,3	44,0	36,6	9,0	0,0	33,7	0,0
104	Jan/12	0,01	27,4	30,3	68,4	34,5	53,8	28,1	33,9	140,3
105	Fev/12	0,07	71,8	81,1	98,5	145,9	123,6	101,7	109,8	81,7
106	Mar/12	0,01	60,6	103,7	47,7	99,4	92,7	40,7	17,8	60,2
107	Abr/12	0,00	132,3	41,7	23,8	9,0	4,8	58,1	2,1	6,5
108	Mai/12	0,00	86,7	19,1	21,0	12,4	20,0	4,0	17,8	5,0
109	Dez/12	1,01	0,0	0,1	0,0	18,9	5,2	0,0	5,7	3,2
110	Jan/13	0,00	31,8	49,1	35,3	37,7	48,5	39,7	20,4	53,0
111	Fev/13	0,16	142,8	89,3	73,9	29,7	13,6	46,0	65,1	27,0
112	Mar/13	21,49	238,1	269,9	233,6	134,2	226,7	125,0	96,0	218,3

Continua

Continuação

113	Abr/13	12,85	200,8	164,3	200,3	104,9	135,2	160,3	154,5	110,4
114	Mai/13	0,94	42,7	49,3	40,0	64,7	33,0	63,9	58,6	20,8
115	Dez/13	2,53	167,4	92,6	194,7	63,5	165,2	48,6	79,1	71,9
116	Jan/14	0,56	44,5	35,9	57,3	56,4	76,0	103,7	91,8	28,0
117	Fev/14	1,10	63,2	48,1	52,2	110,2	169,8	62,8	168,0	97,7
118	Mar/14	2,00	172,1	173,2	151,4	269,5	254,7	316,7	298,6	222,0
119	Abr/14	10,33	70,2	56,4	76,3	112,4	160,6	171,2	202,8	185,9
120	Mai/14	1,11	89,7	44,5	77,1	51,6	66,1	67,3	109,7	43,0
121	Dez/14	0,00	22,1	18,7	53,4	3,1	34,2	18,2	39,1	9,3
122	Jan/15	19,70	35,5	19,6	13,5	6,8	20,4	41,3	36,1	92,0
123	Fev/15	20,80	36,2	20,5	35,0	150,8	36,8	48,0	56,4	32,2
124	Mar/15	7,68	252,4	231,5	196,2	181,0	221,3	191,5	144,5	243,6
125	Abr/15	2,37	34,2	70,6	80,7	132,9	80,0	63,4	58,1	67,0
126	Mai/15	1,03	80,7	23,8	71,9	34,1	83,0	14,5	97,2	75,8
127	Dez/15	1,01	21,4	11,1	35,0	66,0	32,3	17,0	18,4	33,8
128	Jan/16	19,70	174,3	123,5	138,3	240,8	212,7	222,4	177,7	198,0
129	Fev/16	0,07	80,8	76,7	106,3	41,2	67,0	54,9	75,5	114,9
130	Mar/16	1,05	118,9	201,2	100,3	257,8	134,1	200,4	218,7	189,0
131	Abr/16	1,50	34,3	21,7	34,7	15,4	43,9	71,0	39,1	14,0
132	Mai/16	0,00	80,1	13,2	35,6	4,4	51,5	18,9	37,6	26,1
133	Dez/16	1,01	0,0	17,4	14,4	12,6	8,1	11,7	26,0	39,1
134	Jan/17	19,70	53,3	50,4	44,7	37,6	16,0	34,9	26,4	56,8
135	Fev/17	20,80	189,0	49,1	250,7	76,4	153,6	121,7	88,3	249,7

Continua

Continuação

136	Mar/17	2,24	180,1	135,4	171,6	149,1	255,3	142,2	112,2	241,3
137	Abr/17	12,90	171,4	166,5	230,8	184,7	180,3	148,3	158,4	171,8
138	Mai/17	0,49	45,1	17,0	30,1	23,4	31,6	53,9	15,6	60,0
139	Dez/17	0,00	14,5	6,0	24,8	9,2	14,0	4,4	5,7	13,5
140	Jan/18	0,00	174,5	52,1	124,5	93,7	124,1	35,9	53,2	202,0
141	Fev/18	10,96	239,0	283,8	205,8	127,3	288,5	229,3	260,3	180,3
142	Mar/18	2,14	103,3	68,4	67,8	25,9	84,6	129,8	96,4	176,0
143	Abr/18	13,40	251,7	295,6	276,7	189,8	192,1	222,5	275,8	117,6
144	Mai/18	2,02	45,9	63,5	59,2	29,1	17,5	43,4	37,0	34,5
145	Dez/18	0,00	0,0	143,5	146,6	113,4	33,3	69,2	87,9	70,2
146	Jan/19	0,00	16,2	50,4	43,3	39,7	27,8	30,3	17,6	85,3
147	Fev/19	20,14	31,8	118,1	75,9	119,2	274,2	156,4	154,1	292,4
148	Mar/19	5,94	82,6	304,5	163,1	221,4	138,8	228,0	176,6	194,2
149	Abr/19	5,10	26,8	63,7	130,3	102,0	96,3	94,1	208,6	123,2
150	Mai/19	2,39	17,6	41,1	69,5	97,9	127,5	62,7	31,2	103,3

