
INDICADORES HIDROLÓGICOS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MANUEL ALVES DA NATIVIDADE, TOCANTINS

Jéssica Assaid Martins Rodrigues^{1*}, Alberto Carlos de Oliveira Andrade², Marcelo Ribeiro Viola³, Marco Antonio Vieira Morais⁴,

¹ Mestranda em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas; Departamento de Engenharia; Universidade Federal de Lavras; je_assaid@yahoo.com.br*

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação; Departamento de Engenharia; Universidade Federal de Lavras; alberto.ufla@gmail.com

³ Professor; Departamento de Engenharia; Universidade Federal de Lavras; marcelo.viola@deg.ufla.br

⁴ Doutorando em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas; Departamento de Engenharia; Universidade Federal de Lavras; marco.morais@bag.ifmt.edu.br

RESUMO: Objetivou-se no presente trabalho caracterizar o regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Manuel Alves da Natividade, TO, com seção de controle no posto fluviométrico denominado Fazenda Lobeira. Para tanto, foram quantificados indicadores hidrológicos regionais associados a vazões médias, mínimas e máximas, precipitação média na bacia, balanço hídrico anual, além de suas principais características morfométricas. Foram utilizadas cenas do modelo digital de elevação ASTER em ambiente SIG e séries históricas pluviométricas e fluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os resultados mostraram que o regime de chuvas apresenta forte concentração no verão, com 50,4% do total anual entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Os indicadores de eventos hidrológicos extremos máximos mostraram que em um ano hidrológico típico a vazão média de cheia supera em 7,1 vezes a vazão média, e que o evento com recorrência de 100 anos, que é um indicativo do vulto da cheia associada com a inundação da zona ribeirinha supera em 2,2 vezes a vazão média de cheia na bacia. O período de vazante é fortemente influenciado pelo longo período de estiagem, que apresenta 5 meses consecutivos com precipitação inferior a 50 mm (maio a setembro). A análise de indicadores hidrológicos associados com vazões mínimas de referência identificou alta vulnerabilidade natural dos recursos hídricos superficiais, permitindo concluir que o incentivo à adoção de práticas conservacionistas de manejo de bacias hidrográficas e de obras de regularização são essenciais para a otimização dos recursos hídricos superficiais nesta bacia.

Palavras-chave: modelo digital de elevação, morfometria, hidrologia, rendimento específico.

HYDROLOGICAL INDICATORS FOR WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE
MANUEL ALVES NATIVIDADE RIVER WATERSHED, TOCANTINS

ABSTRACT: The objective of this study was to characterize the hydrological regime of the Manuel Alves da Natividade river watershed, TO, at Fazenda Lobeira gauging station. Therefore, regional hydrological indicators were quantified associated with average flow rates, minimum and maximum, average rainfall in the watershed, annual water balance, in addition to its main morphometric characteristics. It was used digital scenes of the elevation model ASTER in SIG environment, rainfall and fluviometric historical data provided by the Brazilian National Water Agency (ANA). The results showed that the rainfall has a strong concentration in the summer, with 50.4% of the annual rainfall between December, January and February. The extreme hydrological events indicators showed that the average daily flood with a recurrence of 2 years exceeds 7.1 times the average flow, and the event with 100 years recurrence interval, exceeds 2.2 times the average daily flood with a recurrence of 2 years in the watershed. The low flows period is strongly influenced by the long period of drought, which features 5 consecutive months with less than 50 mm of rainfall (May to September). The analysis of hydrologic indicators associated to minimum flows identified a high vulnerability of water resources surface, allowing to conclude that the use of watershed conservation practices and investments in regularization works are essential for an optimization of surface water resources in this watershed.

Key-words: digital elevation model, morphometry, hydrology, water yield.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por recursos hídricos e a presença de conflitos em algumas regiões brasileiras a segurança hídrica vem sendo tratada como tema prioritário. Nesse sentido, estudos hidrológicos que colaborem para a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas tornam-se imprescindíveis, uma vez que esta unidade territorial é determinante no ciclo hidrológico de superfície.

Um importante instrumento para o estudo de bacias hidrográficas é a caracterização fisiográfica, que consiste na quantificação de características do meio físico, abrangendo, sobretudo, relevo, rede de drenagem, vegetação, solos e geologia (Vilela & Mattos, 1975). Neste tipo de pesquisa, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) constituem ferramenta fundamental (Deus et al, 2011). O uso dessas ferramentas apresenta uma série de vantagens em relação às operações manuais, como a redução do tempo de processamento e o aumento da acurácia do resultado, fato que se torna mais evidente à medida que o número de operações a serem realizadas aumenta (Maidment, 2002; Almeida & Moreira, 2013).

Outros importantes instrumentos para o estudo das bacias hidrográficas são o balanço hídrico anual, e também, indicadores hidrológicos associados a vazões médias, mínimas e

máximas. Nesta abordagem são necessárias observações hidrológicas, sobretudo do regime de chuvas e de escoamento. Tais indicadores fornecem informações sobre a produção de água na bacia hidrográfica, capacidade de regularização natural de vazões, características dos eventos extremos máximos, entre outros, possibilitando o conhecimento do comportamento hidrológico típico.

A região de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade, que está inserida no sudeste do Estado do Tocantins e que ocupa 5,4% da área total do Estado. O rio Manuel Alves da Natividade (MAN) é um importante afluente pela margem direita do rio Tocantins com relevantes demandas pelo uso dos recursos hídricos visando principalmente a irrigação, dessedentação animal e abastecimento urbano. Estudos hidrológicos são essenciais para subsidiar o planejamento e a tomada de decisão pelo Comitê de Bacia Hidrográfica local.

Neste contexto, objetivou-se no presente estudo realizar a caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Manuel Alves da Natividade, e calcular indicadores hidrológicos associados às vazões mínimas, médias e máximas, visando identificar o seu comportamento hidrológico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na bacia hidrográfica do Rio Manuel Alves da Natividade, localizada na região sudeste do estado do Tocantins, limitada pelas bacias do Rio Palma (ao sul), Balsas (ao norte), Tocantins (a oeste) e São Francisco (a leste). Está localizada entre as coordenadas geográficas 11°09'45" e 12°14'54" de latitude Sul e 46°33'04" e 48°18'40" de longitude Oeste. A bacia abrange 11 municípios e sua localização está apresentada na Figura 1.

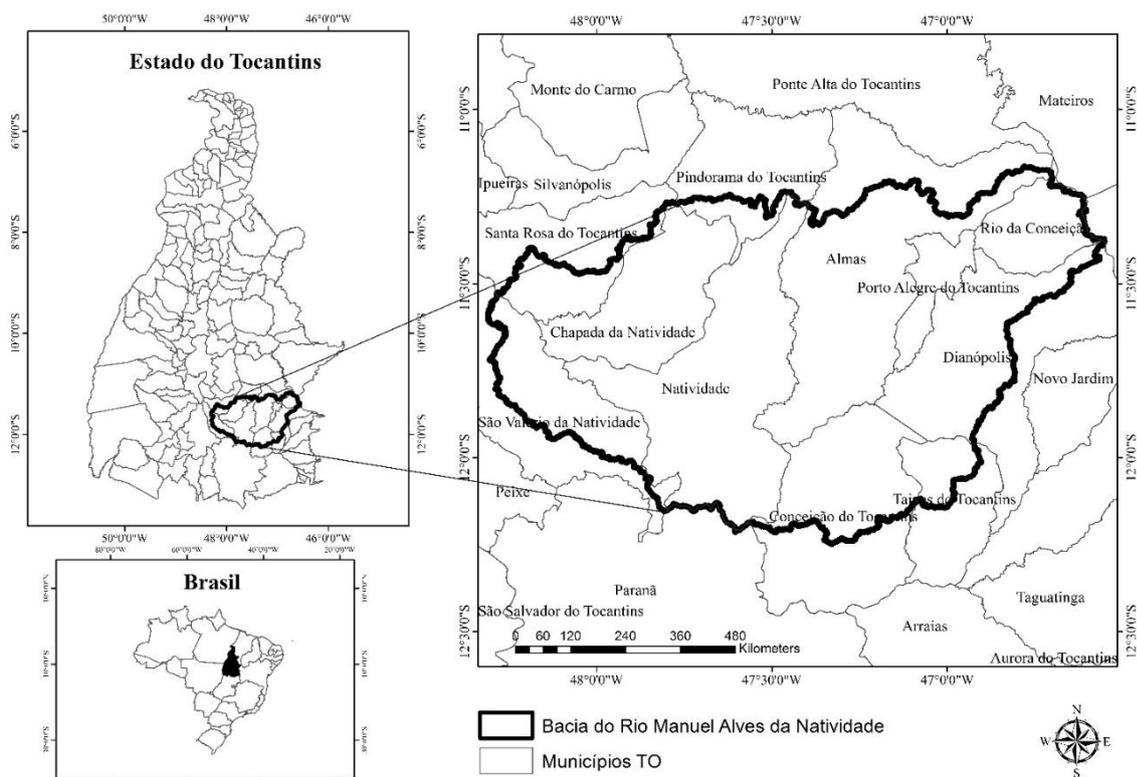


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Manuel Alves da Natividade no território brasileiro e abrangência dos municípios.

2.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A análise morfométrica foi realizada em ambiente SIG, utilizando o modelo digital de elevação (MDE) *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), disponibilizado pelo *United States Geological Survey* (USGS), com resolução espacial de 30 metros.

A caracterização da forma da bacia hidrográfica, rede de drenagem e relevo foi desenvolvida conforme metodologia apresentada por Vilella & Mattos (1975), Tucci (1997) e Mello & Silva (2013). Foram calculados os seguintes coeficientes: fator de forma, coeficiente de compacidade, índice de conformação, densidade de drenagem, frequência de drenos, extensão média do escoamento superficial, sinuosidade e declividade do curso d'água principal. Na sequência apresenta-se o cálculo dos referidos coeficientes:

Coefficiente de compacidade (k_c) (Equação 1): corresponde à relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área, sendo um número adimensional que indica a propensão a ocorrência de enchentes. Quanto mais próximo de 1, maior a propensão a enchentes, enquanto que, valores superiores a 1,50 denotam menor propensão a enchentes (Mello & Silva, 2013).

$$k_c = 0,28 \cdot \frac{P_{BH}}{\sqrt{A_{BH}}} \quad (1)$$

Sendo: P_{BH} o perímetro (m) e A_{BH} a área da bacia hidrográfica (m^2).

Fator de forma (K_f) (Equação 2): corresponde à razão entre a largura média ($L_{médio}$) e o comprimento axial da bacia (L_{ax}), ambos em metros. Valores de K_f menores que 0,5 indicam uma menor tendência a enchentes, entre 0,50 e 0,75 tendência mediana, enquanto valores maiores que 0,75 indicam maior tendência a enchentes.

$$k_f = \frac{L_{médio}}{L_{ax}} \quad (2)$$

Índice de conformação (I_c) (Equação 3): corresponde à relação entre a área da bacia hidrográfica (A_{BH}), em m^2 , e o quadrado de seu comprimento axial (L_{ax}), em m. Expressa a capacidade da bacia em gerar enchentes e pode assumir valores acima e abaixo de 1. Quanto mais próximo de 1, maior a propensão a enchentes, pois indica que a forma assemelha-se a um quadrado, com concentração do fluxo.

$$I_c = \frac{A_{BH}}{(L_{ax})^2} \quad (3)$$

No estudo da rede de drenagem a ordem dos cursos d'água foi realizada seguindo a classificação proposta por Strahler (1957), na qual as nascentes são consideradas como de primeira ordem. Os canais de segunda ordem são aqueles formados por dois ou mais cursos d'água de primeira ordem, sucessivamente.

A densidade de drenagem (D_d), em km km^{-2} (Equação 4), definida por Horton (1945), foi obtida através da razão entre o comprimento total de drenos ($\sum L$), em km, e a área da bacia hidrográfica, em km^2 .

$$D_d = \frac{\sum L}{A_{BH}} \quad (4)$$

A frequência de drenos (D_r) (Equação 5), definida por Horton (1945), é a relação entre o número de drenos (N) obtido no processo de hierarquização da rede de drenagem e a área da bacia hidrográfica.

$$D_r = \frac{N}{A_{BH}} \quad (5)$$

A extensão média do escoamento superficial (C_m) (Equação 6), proposta por Vilela e Mattos (1975), relaciona a densidade de drenagem da bacia hidrográfica com o comprimento médio lateral da rede de drenagem, e consiste da distância média em que a água da chuva teria que escoar sobre a superfície da bacia, caso o escoamento se desse em linha reta, desde o ponto de entrada na bacia até o curso d'água mais próximo.

$$C_m = \frac{1}{4 \cdot D_d} \quad (6)$$

A sinuosidade do curso d'água principal (S) (Equação 7), representa a relação entre o comprimento do curso d'água principal (L) e o comprimento de seu talvegue medido em linha reta (L_t). Quanto maior o seu valor maior a sinuosidade do dreno principal.

$$S = \frac{L}{L_t} \quad (7)$$

A declividade do curso d'água principal (S_1) (Equação 8), corresponde à relação entre a diferença total de elevação do curso d'água principal (h_1) e o comprimento do mesmo (L). Este parâmetro apresenta considerável importância em termos do manejo de bacias

hidrográficas, pelo fato de influenciar diretamente na velocidade do escoamento e, conseqüentemente, no tempo de concentração da bacia hidrográfica (Mello & Silva, 2013).

$$S_1(\%) = \frac{h_1}{L} \cdot 100 \quad (8)$$

2.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

A caracterização hidrológica foi realizada considerando estações com séries históricas disponíveis junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). Foi padronizado o período de 1975 a 2005 para a quantificação dos indicadores hidrológicos. A Tabela 1 apresenta o código e coordenadas das estações e a Figura 1 a sua localização.

Tabela 1. Estações pluviométricas (Pluvi) e fluviométricas (Fluvi) utilizadas na caracterização hidrológica da bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade.

| Estação | Tipo | Código | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|------------------------|-------|----------|-----------|-----------|--------------|
| Almas | Pluvi | 01147000 | -11:34:44 | -47:10:26 | 427 |
| Conceição do Tocantins | Pluvi | 01247000 | -12:13:57 | -47:19:28 | 407 |
| Dianópolis | Pluvi | 01146000 | -11:37:31 | -46:48:38 | 679 |
| Fazenda Lobeira | Pluvi | 01148000 | -11:31:53 | -48:17:41 | 243 |
| Natividade | Pluvi | 01147001 | -11:41:49 | -47:43:42 | 308 |
| Pindorama do Tocantins | Pluvi | 01147002 | -11:08:25 | -47:34:36 | 444 |
| Porto Alegre | Pluvi | 01147003 | -11:36:36 | -47:02:42 | 372 |
| Fazenda Lobeira | Fluvi | 22250000 | -11:31:58 | -48:17:19 | 230 |

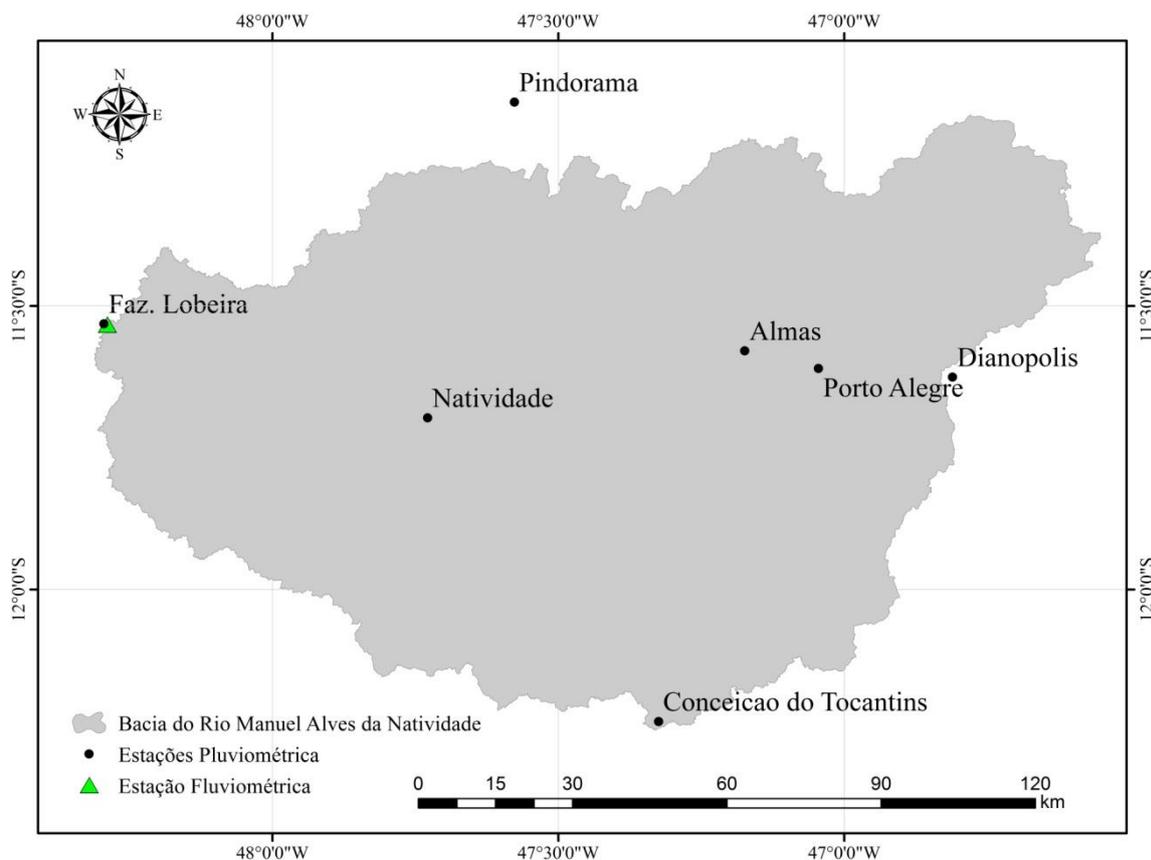


Figura 2. Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade e estação fluviométrica Fazenda Lobeira, tida como seção de controle para o presente estudo.

2.4 BALANÇO HÍDRICO ANUAL

O balanço hídrico consiste no computo das entradas e saídas de água inerentes aos diversos fenômenos do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica, sendo formado pelos seguintes componentes: Precipitação (P); Evapotranspiração (ET); Deflúvio ou Escoamento (D) e Reservas ou armazenamento (R). Porém, na escala de tempo anual, pode-se considerar o armazenamento de água no solo equilibrado, podendo-se assim desprezar o componente R, e ficando a Equação 9 como sendo válida. Adotou-se o ano hidrológico (out-set) para a quantificação do balanço hídrico anual.

$$P = ET + D \quad (9)$$

Para a obtenção da precipitação média na bacia hidrográfica foi utilizada a metodologia dos Polígonos de Thiessen, na qual o peso de cada posto pluviométrico na ponderação é proporcional à área de influência de seu respectivo polígono na bacia.

Com o intuito de se quantificar o processo de transformação chuva-vazão na bacia hidrográfica, foi calculado o coeficiente de escoamento superficial (Equação 10) e o coeficiente de evapotranspiração (Equação 11).

$$C = \frac{D_{\text{anual}}}{P_{\text{anual}}} \quad (10)$$

Sendo: C o coeficiente de escoamento superficial, adimensional, D_{anual} o deflúvio superficial médio anual (mm) e P_{anual} , a precipitação média anual na bacia hidrográfica (mm).

$$C_{ET} = \frac{ET_{\text{anual}}}{P_{\text{anual}}} = 1 - C \quad (11)$$

Sendo: C_{ET} o coeficiente de evapotranspiração, adimensional, ET_{anual} a evapotranspiração média anual (mm) e P_{anual} , a precipitação média anual na bacia hidrográfica (mm).

2.5 INDICADORES REGIONAIS

Os indicadores regionais foram mensurados com base nas metodologias descritas por Tucci (2002), Clarke & Tucci (2003) e trabalhada por Reis et al. (2008), tomando-se por base a série histórica da estação fluviométrica Fazenda Lobeira, tida como seção de controle no presente estudo. Os indicadores hidrológicos foram: a) vazão média: rendimento específico médio de longa duração; b) vazão mínima: rendimentos específicos com 90% de permanência e de sete dias e 10 anos de tempo de retorno, índice de capacidade de regularização natural de vazões e índice de comparação de vazões de referência e c) vazão máxima: indicador da vazão média de cheia, indicador do limite superior da faixa de inundação ribeirinha e rendimento específico máximo. Na sequência apresenta-se o procedimento de cálculo dos indicadores hidrológicos:

A vazão média de longo termo (Q_{MLT}), bastante aplicada em estudos de balanço hídrico em reservatórios de regularização, é dada pela média aritmética das vazões observadas (Equação 12).

$$Q_{MLT} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (12)$$

Sendo: Q_{MLT} a vazão média de longo termo ($m^3 s^{-1}$), Q_i a vazão diária ($m^3 s^{-1}$) e N o número de observações.

O rendimento específico médio de longa duração ($RE_{Q_{MLT}}$), em $L s^{-1} km^{-2}$, foi obtido pela divisão da vazão média de longo termo pela área de drenagem, em km^2 , conforme a equação a seguir:

$$RE_{Q_{MLT}} = \frac{Q_{MLT}}{A_{BH}} \cdot 1000 \quad (13)$$

Foram calculadas as vazões de referência Q_{90} (vazão igualada ou superada em 90% do tempo) e $Q_{7,10}$ (vazão mínima de sete dias consecutivos e 10 anos de tempo de retorno). A vazão de referência Q_{90} foi obtida a partir da curva de permanência, conforme Mello e Silva (2013). Para o cálculo da $Q_{7,10}$, inicialmente tabulou-se a série de vazões mínimas de sete dias consecutivos (Q_7), conforme descrito por Oliveira (2013). Em seguida, foi aplicada a distribuição de probabilidades Gumbel para mínimos (Equações 14, 15 e 16), de acordo com Mello & Silva (2013). Previamente à utilização da distribuição, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância para verificar a adequabilidade da distribuição para a modelagem das frequências da série de Q_7 .

$$X_{TR} = \frac{\ln(-\ln(1-\frac{1}{TR}))}{\alpha} + \mu \quad (14)$$

$$\mu = \bar{X} + 0,45 \cdot S \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (16)$$

Sendo: X_{TR} a variável hidrológica associada à recorrência TR , α e μ os parâmetros da distribuição de Gumbel, \bar{X} e S a média e o desvio padrão da série de Q_7 , respectivamente.

Para expressar a disponibilidade hídrica durante o período de vazante foram calculados os rendimentos específicos com 90% de permanência (RE_{90}) (Equação 17), e o de sete dias e 10 anos de tempo de retorno ($RE_{7,10}$) (Equação 18). Os valores de $RE_{7,10}$ foram interpretados

de acordo com a classificação proposta pelo Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG), apresentada na Tabela 2.

$$RE_{90} = \frac{Q_{90}}{A_{BH}} \cdot 1000 \quad (17)$$

Sendo: RE_{90} o rendimento específico com 90% de permanência ($L s^{-1} km^{-2}$), Q_{90} a vazão com 90% de permanência ($m^3 s^{-1}$) e A_{BH} a área da bacia hidrográfica (km^2).

$$RE_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{A_{BH}} \cdot 1000 \quad (18)$$

Sendo: $RE_{7,10}$ o rendimento específico de sete dias e 10 anos de tempo de retorno ($L s^{-1} km^{-2}$), $Q_{7,10}$ a vazão mínima de sete dias e 10 anos de tempo de retorno ($m^3 s^{-1}$) e A_{BH} a área da bacia hidrográfica (km^2).

Tabela 2. Vulnerabilidade natural dos recursos hídricos superficiais em função do valor do rendimento específico de sete dias e 10 anos de tempo de retorno ($RE_{7,10}$)

Fonte: (ZEE-MG, 2015)

| Vulnerabilidade Natural | $RE_{7,10}$ ($L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) |
|-------------------------|--|
| Muito Alta | < 1,5 |
| Alta | 1,5 – 2,5 |
| Média | 2,5 – 3,5 |
| Baixa | 3,5 – 5,5 |
| Muito Baixa | > 5,5 |

O índice de capacidade de regularização natural do escoamento ($I_{7,10}$) foi aplicado para avaliar a magnitude da vazão mínima de referência $Q_{7,10}$ na bacia. Quanto menor este índice, menor é a capacidade de regularização natural do curso d'água. Seu cálculo foi dado pela Equação 19. A Tabela 3 apresenta a classificação proposta pelo Atlas Digital das Águas de Minas, desenvolvido por Euclides et al. (2005).

$$I_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{Q_{MLT}} \cdot 100 \quad (19)$$

Tabela 3. Classificação do índice de capacidade de regularização natural de vazões $I_{7,10}$.
 Fonte: Euclides et al (2005).

| $I_{7,10}$ | Capacidade de Regularização |
|------------------------|-----------------------------|
| < 10 | Baixa |
| $10,1 < I_{7,10} < 30$ | Média |
| $30,1 < I_{7,10} < 40$ | Alta |
| $40,1 < I_{7,10} < 70$ | Muito alta |

Para quantificar a proporção entre as duas vazões de referência habitualmente empregadas pela gestão de recursos hídricos no Brasil, a Q_{90} e a $Q_{7,10}$, foi calculado o índice de comparação de vazões de referência (I_c), conforme a Equação 20:

$$I_c = \frac{RE_{90}}{RE_{7,10}} \quad (20)$$

O indicador da vazão média de cheia (r_{mc}), adimensional, (Equação 21), representa a relação entre a vazão média de enchente (Q_{mc}) e a vazão média de longo termo. Este indicador possibilita avaliar a amplitude das enchentes com relação às condições médias (Castiglioni, 2013). A Q_{mc} , por sua vez, corresponde a vazão máxima associada a um tempo de retorno de 2 anos. De acordo com Tucci (2002) o r_{mc} é um indicador da vazão que está relacionada com a cota superior do leito menor de rios aluvionares.

$$r_{mc} = \frac{Q_{mc}}{Q_{MLT}} \quad (21)$$

O indicador do limite superior da faixa de inundação ribeirinha (r_{100}), adimensional, (Equação 22), representa a relação entre a vazão máxima associada ao tempo de retorno de 100 anos (Q_{100}), e a vazão média de enchente. De acordo com Castiglioni (2013) o r_{100} representa a relação entre a capacidade de escoamento do leito menor e a capacidade de escoamento do limite de inundação do vale. De acordo com IGAM (2010) os indicadores r_{mc} e r_{100} sofrem influência de fatores como as características da chuva intensa e sua distribuição espaço-temporal, e também das características geomorfológicas dos rios. Ainda de acordo com estes

autores o indicador r_{mc} apresenta maior variabilidade que o indicador r_{100} . Os valores de Q_{100} e de Q_{mc} foram calculados empregando-se a distribuição Gumbel para máximos, conforme Mello & Silva (2013) (Equações 16, 23 e 24), tendo sido a adequabilidade da distribuição verificada pelo teste de Kolmogorov Smirnov ao nível de 5% de significância.

$$r_{100} = \frac{Q_{100}}{Q_{mc}} \quad (22)$$

$$X_{TR} = \frac{-\ln(-\ln(1-\frac{1}{TR}))}{\alpha} + \mu \quad (23)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,45.S \quad (24)$$

O rendimento específico máximo ($RE_{Q_{max}}$), em $L s^{-1} km^{-2}$, foi obtido conforme a Equação 25:

$$RE_{Q_{max}} = \frac{Q_{max}}{A_{BH}} \cdot 1000 \quad (25)$$

Em que, Q_{max} é a vazão média máxima diária anual, em $m^3 s^{-1}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 está apresentado o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) obtido para a bacia hidrográfica do Rio Manuel Alves de Natividade com seção de controle no posto fluviométrico Fazenda Lobeira. A atitude média da bacia foi de 410 metros com mínima de 235 metros e máxima de 959 metros.

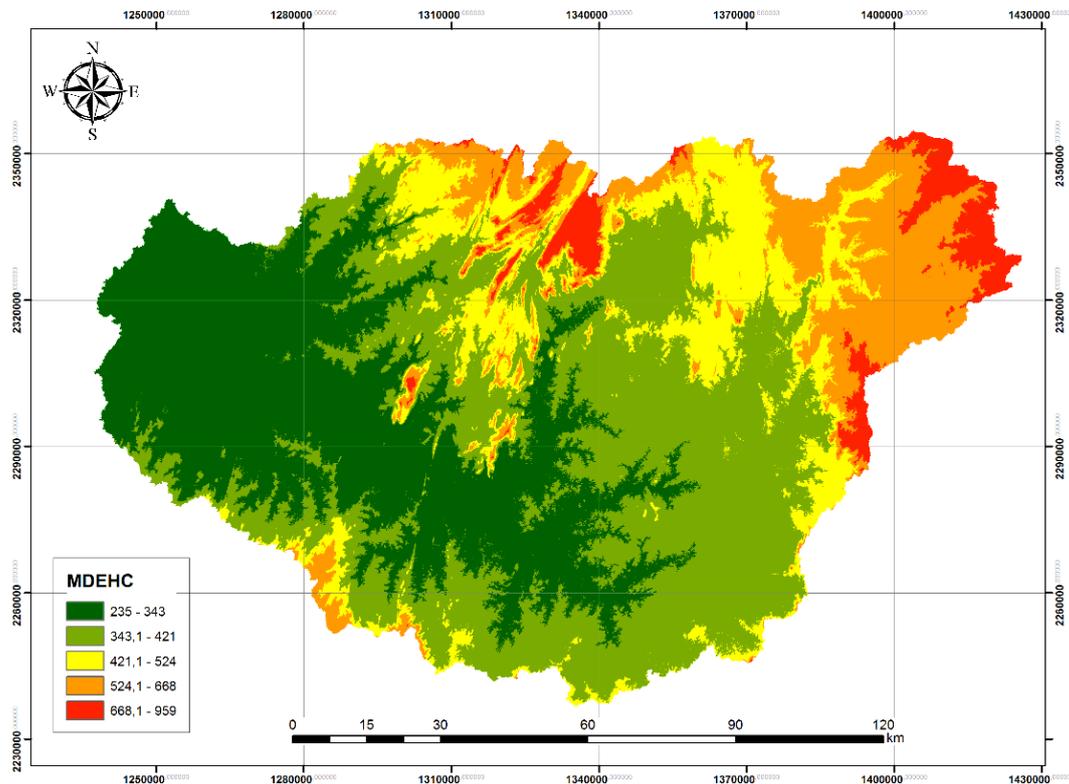


Figura 3. Modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC)

Os resultados da caracterização morfológica da bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade estão apresentados na Tabela 4. A área de drenagem calculada foi de 14.456,7 km², com perímetro de 868,1 km e comprimento axial de 185,2 km. A altitude na seção de controle foi de 235 m e na nascente do curso d'água principal de 700 m.

Tabela 4. Resultados obtidos na caracterização morfométrica.

| PARÂMETROS | VALORES |
|--|------------------------------|
| Comprimento médio (\bar{L}) | 80,11 km |
| Comprimento do curso d'água principal (L) | 312,71 km |
| Comprimento do Talvegue (Lt) | 179,77 km |
| Coefficiente de compacidade (k_c) | 2,02 |
| Fator de forma (k_f) | 0,43 |
| Índice de conformação (I_c) | 0,42 |
| Número de drenos | 9209 |
| Comprimento total da hidrografia | 11.456,33 km |
| Classificação dos drenos (Método de Strahler) | 7ª ordem |
| Densidade de drenagem (D_d) | 0,80 km km ⁻² |
| Densidade da Rede de Drenagem (D_r) | 0,64 drenos km ⁻² |
| Extensão média do escoamento superficial (C_m) | 0,31 km |
| Sinuosidade do curso d'água principal | 1,74 |
| Declividade do curso d'água principal (S_1) | 1,49 % |

Considerando os resultados obtidos, pode-se classificar a bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade como de menor propensão a grandes enchentes, como reflexo de seu formato alongado. Isto pode ser confirmado pelo coeficiente de compacidade (K_c) maior que 1,5, fator de forma (K_f) menor que 0,5 e índice de conformação menor que 0,51. O formato alongado da bacia hidrográfica contribui para a amortização das vazões ao longo do curso d'água principal, atenuando o vulto das enchentes (Torres et al., 2010).

Quanto à delimitação da rede de drenagem derivada numericamente verificou-se que o limiar mínimo de 1000 pixels de fluxo acumulado foi adequado para reconstituir a densidade de drenagem de cartas topográficas locais, na escala 1:50.000. O curso d'água principal apresentou extensão de 312,7 km e o comprimento total da rede de drenagem foi de 11.456,3 km, com 9209 drenos.

Segundo Villela & Mattos (1975), a densidade de drenagem pode oscilar de 0,5 km km⁻² em bacias com drenagem pobre a 3,5 km km⁻² em bacias bem drenadas. A reduzida densidade

de drenagem calculada ($0,80 \text{ km km}^{-2}$), conciliada às reduzidas ordem hierárquica (7ª ordem) e frequência de drenos ($0,64 \text{ drenos km}^{-2}$) permitem concluir que o sistema de drenagem da bacia hidrográfica é pouco desenvolvido. Esses parâmetros auxiliam de forma expressiva na gestão dos recursos hídricos, visto que indicam o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem da bacia hidrográfica (Arai et al., 2012).

De acordo com Cardoso et al. (2006), a declividade do terreno influencia a velocidade do escoamento superficial, e conseqüentemente, o tempo de oportunidade para infiltração de água no solo. O relevo na bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade (Figura 4) é suave-ondulado em 36,82% e plano em 22,36% de sua área, caracterizando áreas favoráveis à recarga. Em 32,47%, 6,73%, 1,47% e 0,35% o relevo é ondulado, forte ondulado, montanhoso e forte-montanhoso, respectivamente, os quais favorecem o deslocamento de água na superfície, quando comparados aos primeiros.

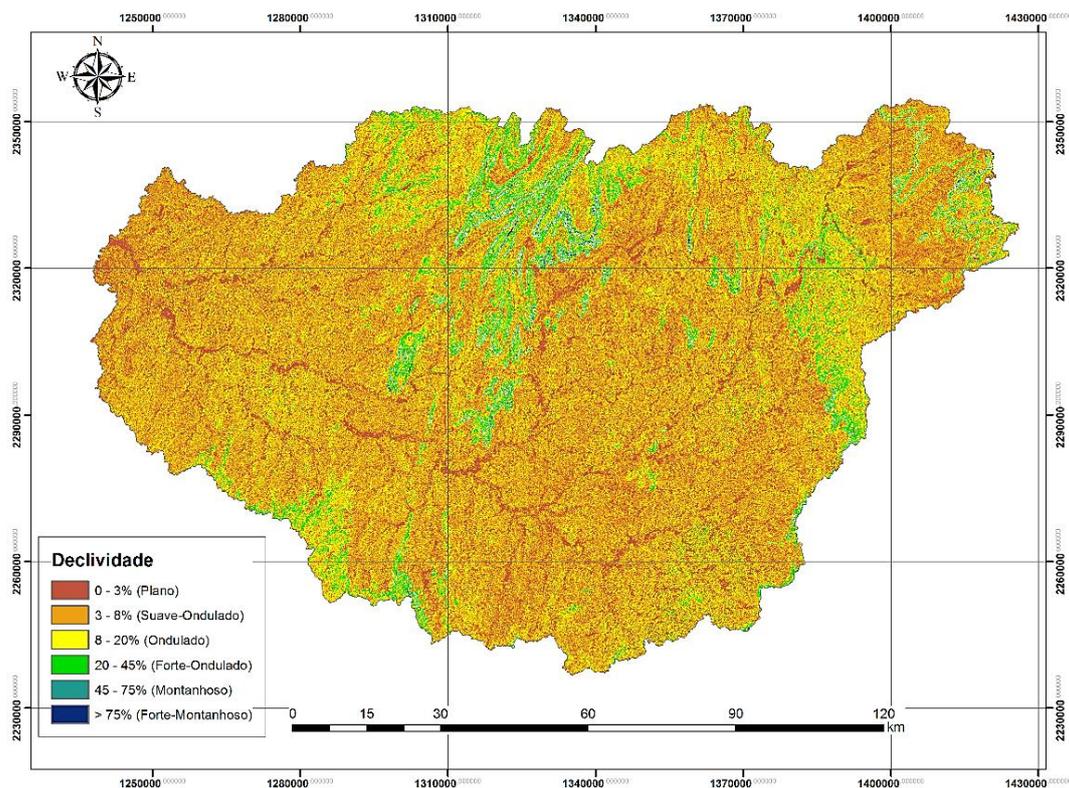


Figura 4. Classes de declividade para a bacia do rio Manuel Alves da Natividade.

Os resultados do balanço hídrico anual mostraram que a precipitação média anual na bacia do rio Manuel Alves da Natividade é de 1382 mm ano⁻¹, com deflúvio de 426,8 mm ano⁻¹ e evapotranspiração de 955,2 mm ano⁻¹. A precipitação é distribuída desigualmente durante entre as estações, sendo 50,4% no verão (dez-jan-fev), 25,4% no outono (mar-abr-mai), 0,8 % no inverno (jun-jul-ago) e 23,4 % na primavera (set-out-nov), podendo-se caracterizar o verão como chuvoso e inverno seco. Os meses de maior lâmina precipitada são dezembro (242,20 mm) e janeiro (242,61 mm); já os meses de menor são junho (4,07 mm) e julho (2,00 mm). A distribuição do deflúvio por estação é de 207,1 mm no verão (48,5%), 152,48 mm no outono (35,7%), 28,97 mm no inverno (6,8%) e 38,25 mm na primavera (9%). A Figura 5 apresenta o hietograma de precipitação média mensal na bacia hidrográfica, obtida pela metodologia dos polígonos de Thiessen.

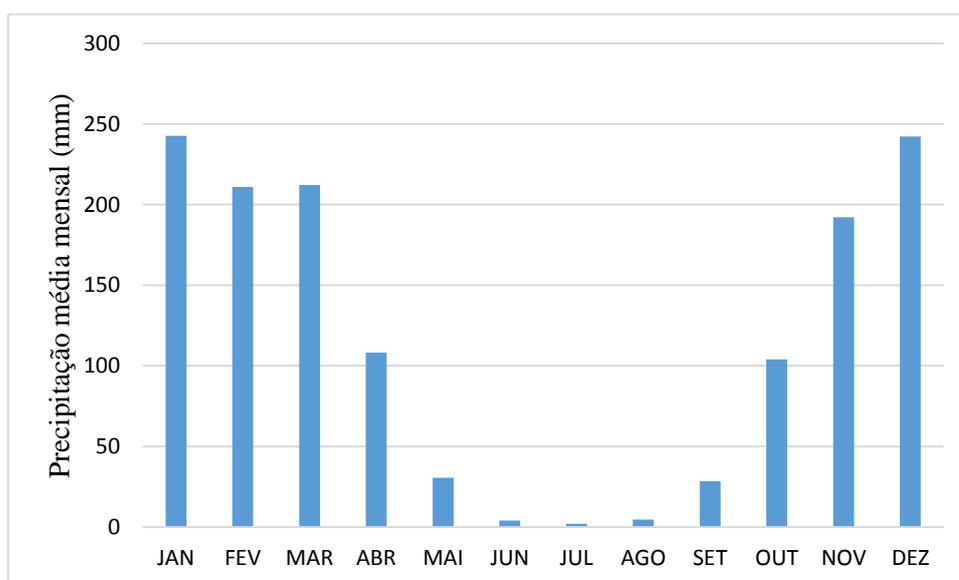


Figura 5. Hietograma de precipitação média mensal na bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade obtido por polígonos de Thiessen.

Na Figura 6 apresenta-se a distribuição Gumbel ajustada às séries de Q_7 (Figura 6a) e de Q_{MAX} (Figura 6b). Para as duas análises a distribuição Gumbel mostrou-se adequada ao nível de 5% significância pelo teste Kolmogorov Smirnov.

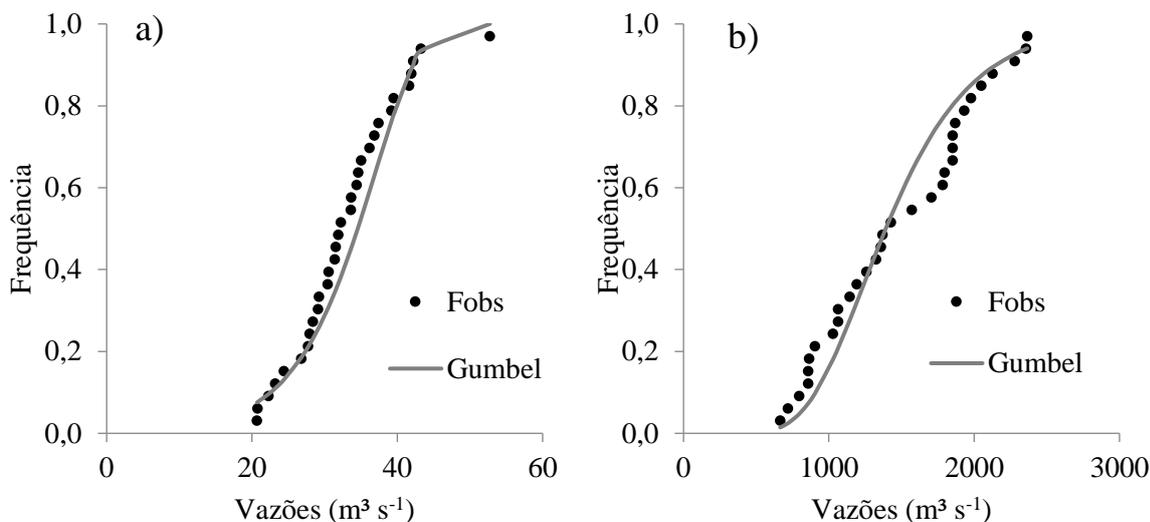


Figura 6. Distribuição Gumbel ajustada às séries de vazão mínima de sete dias consecutivos (Q_7) (a) e de vazão máxima diária anual (Q_{max}) (b).

A vazão média de longo termo (Q_{MLT}) é de $200,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que representa um rendimento específico médio ($RE_{Q_{MLT}}$) de $13,8 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. A análise das vazões máximas chegou a um rendimento específico máximo ($RE_{Q_{max}}$) de $97,7 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. O valor do indicador da vazão média de cheia (r_{mc}) mostra que em um ano hidrológico típico, a cheia supera em cerca de 7,1 vezes a vazão média. A vazão máxima associada ao tempo de retorno de 100 anos (Q_{100}), que é um indicativo do vulto da cheia que cobre o leito superior do curso d'água é $3101,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mostrando que o vulto desta vazão equivale a 2,2 vezes a vazão média de cheia na bacia.

A curva de permanência está apresentada na Figura 7. As vazões com 90% e 95% de permanência (Q_{90} e Q_{95} , respectivamente) são de $34,4$ e $30,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, o que equivale a rendimentos específicos de $2,38$ ($RE_{Q_{90}}$) e $2,08$ ($RE_{Q_{95}}$) $\text{L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, respectivamente. Tomando-se por referência o critério de outorga a fio d'água no Estado do Tocantins que é de 75% da Q_{90} , a vazão outorgável a fio d'água na bacia é de $25,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

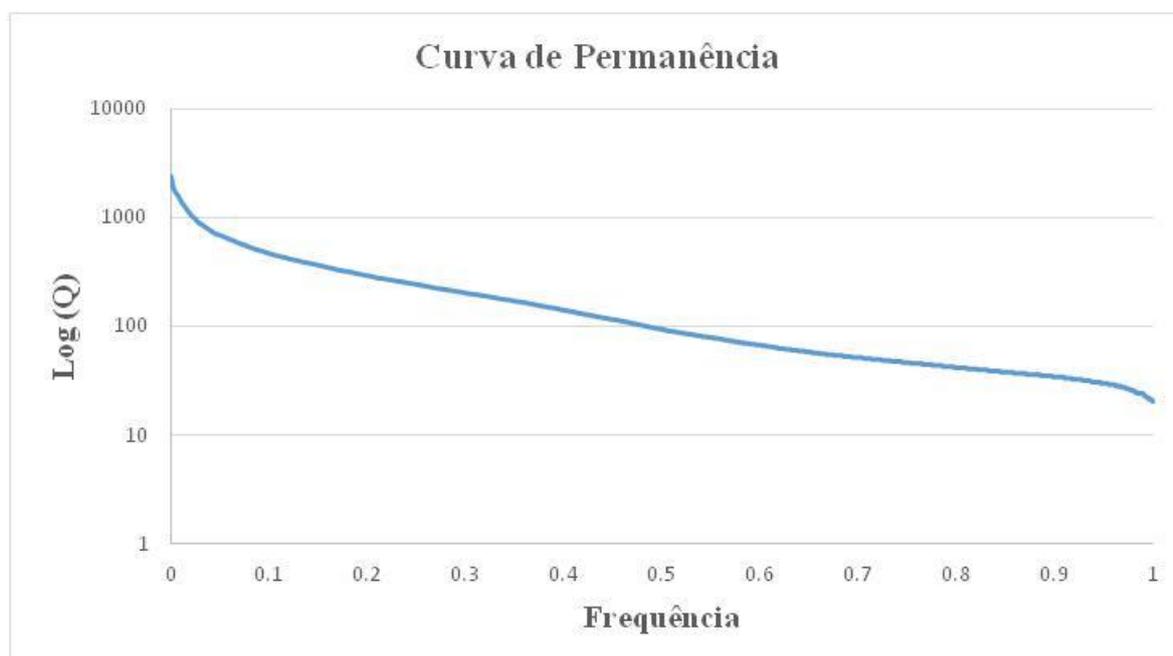


Figura 7. Curva de permanência obtida para o posto fluviométrico Fazenda Lobeira, no rio Manuel Alves de Natividade.

O rendimento específico mínimo de sete dias e tempo de retorno de 10 anos ($RE_{7,10}$) é de $1,35 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Tal resultado está enquadrado na classe de alta vulnerabilidade natural dos recursos hídricos superficiais, de acordo com a classificação apresentada pelo Zoneamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais (Tabela 2). Ainda no tocante à análise da severidade do período de vazante na bacia, o índice de regularização natural de vazões ($I_{7,10}$) mostrou que a vazão de referência $Q_{7,10}$ equivale a 9,76 % da Q_{mt} . De acordo com o Atlas Digital das Águas de Minas este valor é restritivo, uma vez que se encontra próximo do limiar da classe considerada de baixa capacidade de regularização natural ($I_{7,10} < 10\%$). Tais resultados permitem concluir que investimentos visando regularizar o escoamento na bacia do rio Manuel Alves da Natividade são prioritários para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos deste manancial. Neste sentido podem ser indicados investimentos em obras que propiciem o aumento da segurança hídrica, como a construção de barramentos de regularização, e também o incentivo a adoção de práticas de manejo de bacias hidrográficas, tais como construção de bacias de infiltração, incentivo ao plantio direto e adoção de práticas conservacionistas que corroboram para a infiltração de água no solo.

4. CONCLUSÕES

A caracterização fisiográfica mostrou que a bacia hidrográfica do rio Manuel Alves da Natividade apresenta predominância de relevo suave ondulado, baixa propensão à ocorrência de grandes enchentes e rede de drenagem de 7ª ordem de acordo com a classificação de Strahler.

A análise do balanço hídrico anual mostrou que dos 1382 mm de precipitação média no ano hidrológico (out-set), 426,8 mm são convertidos em escoamento, o que equivale a um coeficiente de escoamento de 30,9%.

O regime hidrológico é fortemente influenciado pelo longo período de estiagem que ocorre na bacia. A Q_{90} , vazão de referência para outorga no Estado do Tocantins, equivale a 17,2% da vazão média de longo termo, e apresenta magnitude que a insere na classe de alta vulnerabilidade natural dos recursos hídricos superficiais, de acordo com a classificação do ZEE-MG. Conclui-se que é prioritária a adoção de medidas que objetivem regularizar o escoamento do rio Manuel Alves da Natividade visando o melhor aproveitamento dos recursos hídricos neste manancial.

5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W. A; MOREIRA, M. C. Desenvolvimento de extensões no ArcGIS para obtenção automática de estatísticas a montante de pontos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Bento Gonçalves-RS. **Resumos...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

ARAI, F. K., OLIVEIRA, F. C., DAMÁLIA, L. D. Caracterização hidromorfométrica da bacia do Dourados localizada no centro-sul do Mato Grosso do Sul. **Revista Agrarian**. p. 270–280, 2012.

CARDOSO, A. C.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo - RJ. **Árvore**, v. 30, p.241-248. 2006.

CASTIGLIONI, I. F. Análise regional de vazões para a bacia hidrográfica do Rio Itapemirim. 2013. 170 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2013.

CLARKE, R.T.; TUCCI, C.E.M. Regionalização Hidrológica. In: PAIVA, J.B.D. de & PAIVA, E.M.C.D. DE (Orgs.), **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 169-222, 2003.

DEUS, F. P.; SILVA, L. A.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Caracterização morfológica e climática da sub-bacia do córrego Cana-Brava do município de Guaraciama - MG. **Scientia Plena**, v. 7, p. 8, 2011.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. Atlas digital das águas de Minas. Viçosa: UFV/RURALMINAS/IGAM, 2005. 78 p.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc America Bulletin**, v.3, n.56, 1945.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão de Águas. Plano Diretor de Recursos Hídricos dos Afluentes Mineiros dos rios Mogi-Guaçu/Pardo. 2010. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/Flavia/ctplan/5-relatorio-sintese-pdrh-gd06-partei.pdf> Acesso em: 03 maio 2015.

MAIDMENT, D. Arc Hydro: GIS for Water Resources, ESRI Press, Redlands, CA. 2002.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras, MG: Ed. UFLA, 2013. 455 p.

OLIVEIRA, V. A. Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 e GD2, Minas Gerais. 2013. 99 f. **Dissertação** (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2013.

REIS, J. A. T.; GUIMARÃES, M. A.; BARRETO NETO, A. A.; BRINGHENTI, J. Indicadores regionais aplicáveis à avaliação do regime de vazão dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana. **Geociências**, v.21, n.4, p.509-516, 2008.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, p. 913-920, 1957.

TORRES, J. L. R.; GUIDOLINI, J. F.; SANTANA, M. G.; SANTOS, E. C.; LAUREANO, M. B. J. Avaliação das características morfológicas e hidrológicas da microbacia do córrego Buracão, afluente do rio Uberaba. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia v.11, n.33, p.157-167, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 1997.

TUCCI, C.E.M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 256 p., 2002.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245 p., 1975.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. (coord.)
Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em
<<http://www.zee.mg.gov.br/>> Acesso em: 15 jan. 2016.