



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA
SATURADA DA RESERVA BIOLÓGICA DO CUIEIRAS,
AMAZÔNIA CENTRAL**

ALEXANDRE SOUZA BASTOS

Manaus, Amazonas

Junho, 2019

ALEXANDRE SOUZA BASTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA
SATURADA DA RESERVA BIOLÓGICA DO CUIEIRAS,
AMAZÔNIA CENTRAL**

ORIENTADORA: Prof. Dra. Maria Terezinha Ferreira Monteiro.

Co-orientador: Prof. Dr. Sávio José Filgueira Ferreira.

Fonte Financiadora: FAPEAM.

Trabalho apresentado ao Instituto Nacional de Pesquisas da
Amazônia – INPA como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Clima e Ambiente.

Manaus, Amazonas

Junho, 2019

SEDAB/INPA © 2019 - Ficha Catalográfica Automática gerada com dados fornecidos pelo(a) autor(a) Bibliotecário responsável: Jorge Luiz Cativo Alauzo - CRB11/908

B327e BASTOS, Alexandre Souza

Estudo do comportamento do fluxo de água na zona saturada da reserva biológica do Cuieiras, Amazonas Central/Alexandre Souza Bastos; Orientadora Maria Terezinha Ferreira Monteiro; Co-orientador Sávio José Filgueira Ferreira. Manaus – AM, 2019.

51 f.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente). Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2019.

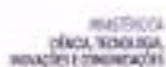
1. Variabilidade do lençol freático. 2. Condutividade hidráulica saturada. 3. Fluxo subterrâneo.
I. Monteiro, Maria Terezinha Ferreira, Orient. II. Ferreira, Sávio José Filgueira, Co-orient.

CDD: 551.66813

Sinopse:

Estudou-se questões relacionadas à estrutura da água, ao comportamento do fluxo na zona saturada do solo, à condutividade hidráulica nas condições topográficas platô, vertente e baixo, relacionando-os à variação do nível freático sazonal interanual; análise de séries históricas de piezometria (2003 a 2017) e pluviometria (2002 a 2018).

Palavras-chave: Série histórica, Floresta natural, Nível do lençol freático.



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E
AMBIENTE DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA
AMAZÔNIA E UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS.

Aos 18 dias do mês de julho do ano de 2019, às 08:30 horas, no Auditório do Prédio COCAP - INPA/Campus I, sito à Av. André Araújo, 2936 – Bairro de Petrópolis, reuniu-se a Comissão Julgadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. Maria Terezinha Ferreira Monteiro (Presidente), Prof. Dr. Luiz Antônio Candido (INPA) e o Prof. Dr. Javier Tomasella (CEMADEN), tendo como suplente o Prof. Dr. Márcio Luiz da Silva (INPA), sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública do trabalho de dissertação de Alexandre de Souza Bastos "ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA SATURADA DA RESERVA BIOLÓGICA DO CUIEIRAS, AMAZÔNIA CENTRAL", orientado pela Profa. Dra. Maria Terezinha Ferreira Monteiro (INPA) e co-orientado pelo Prof. Dr. Sávio José Filgueiras Ferreira (INPA).

O Presidente da Comissão Julgadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Julgadora de Defesa Pública. A Comissão Julgadora, então, se reuniu e os membros emitiram os seguintes pareceres:

Nome	Parecer	Assinatura
Maria Terezinha Ferreira Monteiro	(-) Aprovado () Reprovado	
Luiz Antônio Candido	(x) Aprovado () Reprovado	
Javier Tomasella	(x) Aprovado () Reprovado	

Nada mais havendo a relatar, foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Julgadora.

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares em especial ao meu avô Antônio Leão, à minha mãe Maria do Carmo, aos meus irmãos Alex e Heloysa;

Às instituições de educação e qualificação que acolhem a todos que buscam o saber desde a infância até a formação acadêmica;

Aos professores em especial ao Prof. André Ricardo Ghidini por sua sabedoria, atenção e ajuda a distância; à Doutora Maria Terezinha Ferreira Monteiro e ao Doutor Sávio José Filgueira Ferreira orientadores exímios durante o curso de mestrado no INPA; ao Doutor Ingo Wahnfried e ao Doutor Javier Tomasella pela valiosa orientação profissional e à especial incentivadora Doutora Maria do Socorro Rocha da Silva.

Aos meus colegas de mestrado pela cumplicidade em manterem-se firmes no transcorrer dos desafios em sala de aula e em campo de pesquisa.

Aos clientes que consolidarão a minha realização profissional.

AGRADECIMENTO

A Deus por abençoar essa formação profissional escolhida com carinho, dedicação e responsabilidade;

As instituições INPA, UEA e CLIAMB pela oportunidade de estudar e desenvolver um trabalho científico. Ao LBA e ao Grupo de hidrologia pelo apoio nos trabalhos de campo.

Na procura de conhecimentos, o primeiro passo é o silêncio, o segundo ouvir, o terceiro lembrar, o quarto praticar e o quinto ensinar aos outros.

Texto Judaico

RESUMO

As informações sobre o comportamento do fluxo subterrâneo de altas a baixas altitudes na região amazônica, em ambientes naturais, quanto à velocidade e ao fluxo de base, ainda são incipientes e não refletem sua relevância atual relacionadas a dinâmica da água em diferentes níveis topográficos. Analisou-se o comportamento da água na zona saturada do solo, o fluxo subterrâneo a partir de estimativas da condutividade hidráulica, em áreas de vertente e baixio, sob escala sazonal e interanual de 2003 a 2017, na reserva Biológica do Cuieiras na Amazônia Central ao norte da cidade de Manaus. Através de piezômetros distribuídos no local estimou-se os valores médios de condutividade hidráulica. Constatou-se alta heterogeneidade com variação de 30mm/h mínimo e máximo de 511mm/h; maior velocidade do fluxo em locais com alta condutividade e velocidade menor em áreas com baixa condutividade hidráulica saturada do solo. No baixio o nível oscilou numa frequência de 0,10m a 0.60m; na vertente de 3m a 5m e no platô de 23m a 42m de profundidade. O fluxo de base, no baixio, apresentou-se mais lento e variou de $1.00 \pm 4.20E-6m^3/s$. Considera-se importante que seja explorado esse resultado para caracterização de estudos complementares que envolvam a transmissividade, transporte de solutos, via subterrânea, e recarga de aquífero livres consoante às sequências topográficas da região.

Palavras-chave: Variabilidade do lençol freático; Condutividade hidráulica saturada e Fluxo subterrâneo.

ABSTRACT

Information on the behavior of underground flow from high to low altitudes in the Amazon region, in natural environments, as to velocity and base flow, is still incipient and does not reflect its current relevance related to water dynamics at different topographic levels. The behavior of water in the saturated soil zone, the groundwater flow from estimates of hydraulic conductivity in slope and shallow areas, under seasonal and interannual scale from 2003 to 2017, in the Cuieiras Biological Reserve in the Central Amazon to the north was analyzed. From the city of Manaus. Through piezometers distributed on site, the average values of hydraulic conductivity were estimated. High heterogeneity was observed with a minimum and maximum variation of 30mm / h and 511mm / h; higher flow velocity in locations with high conductivity and lower velocity in areas with low saturated soil hydraulic conductivity. At the level the level oscillated at a frequency of 0.10m to 0.60m; on the slope from 3m to 5m and on the plateau from 23m to 42m deep. In the basal flow, the shoal was slower and varied from $1.00 \pm 4.20E-6m^3/s$. It is considered important that this result be explored to characterize complementary studies involving the transferability, transport of solutes, and underground and free aquifer recharge according to the topographic sequences of the region

Keywords: Groundwater variability, saturated hydraulic conductivity and groundwater flow.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo Geral.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
Capítulo 01	21
RESUMO	23
ABSTRACT	24
INTRODUÇÃO.....	25
MATERIAL E MÉTODOS	27
Área de Estudo.....	27
Topográfica (platô, vertente e baixio).....	27
Geologia e Solos	28
Determinação da Condutividade Hidráulica saturada (k)	29
Cálculo da velocidade do fluxo subterrâneo	30
Limites da água subterrânea	31
Análise de dados	32
RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
Análise do nível freático	33
Relação da precipitação e Nível freático.....	35
Parâmetros de condutividade hidráulica saturada (K)	37
Parâmetros do fluxo subterrâneo	39
CONCLUSÃO.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise exploratória dos dados condutividade Hidráulica.....	39
Tabela 2. Resultados obtidos para o fluxo subterrâneo.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da Bacia do Amazonas e seus limites geológicos.....	15
Figura 2. Hidrogeologia da região Norte do Brasil.....	16
Figura 3. Elevação topográfica SRTM.....	17
Figura 4. Imagem de satélite de Manaus-AM e os limites da Reserva Biológica do Cuieiras.....	27
Figura 5. A- Mapa 3D da microbacia e B – Seção transversal.....	28
Figura 6. Parâmetros geométricos dos piezômetros necessários para a equação de Hvorslev.....	30
Figura 7. A- Torre K-34 e B: Pluviógrafo e área de localização da torre e do transecto dos piezômetros.....	32
Figura 8. Variação sazonal e interanual do nível freático e análise quantitativa da distribuição dos dados de medição taqueométrico da série histórica de 2003 a 2016; A – 4 piezômetros (PZ) do baixio; A.1 – 4 piezômetros (PZ) do baixio continuação; B – 2 piezômetros (PZ) da vertente e C – 3 piezômetros (PZ) no platô.....	
Figura 9. Média climatológica da microbacia do Igarapé-Asú.....	35
Figura 10. Média temporal de precipitação anual acumulada (mm).....	36
Figura 11. Precipitação e nível do lençol freático de 2003 a 2017.....	36
Figura 12. Variabilidade da condutividade hidráulica saturada do solo.....	37
Figura 13. Curvas médias de referência dos ensaios slug test para terminar o tempo de retardo.....	38
Figura 14. Valores médios do fluxo de base da vertente ao baixio.....	40
Figura 15. Fluxo de base para o período de 2003 a 2017.....	41

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

A – rea Superficial.

AmW – Clima quente e mido.

AM – Amazonas.

Δh – Variação na Carga hidráulica.

Q – fluxo de base.

L – Comprimento.

q – Velocidade de aparente.

K – Condutividade Hidráulica.

i – Gradiente Hidráulico.

K – Condutividade Hidráulica.

R – Raio do furo do poço.

r – Raio do revestimento.

T₀ – Tempo decorrido inicial.

LBA – Programa de Grande Escala da Biosfera Atmosfera.

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

RBC – Reserva Biológica do Cuieiras.

INTRODUÇÃO

O ecossistema amazônico se destaca como a maior extensão de floresta tropical do mundo, com diferentes tipos de relevo e solos e a tornam uma região detentora de uma rede hidrográfica complexa de processos físicos, químicos e biológicos que refletem no sistema de drenagem da bacia hidrográfica (BERNARDI et al, 2009).

Com alta diversidade florística a Amazônia é considerada a região pré-andina de vasta biodiversidade, cerca de 80% situada na Amazônia brasileira, com predominância fisionômica florestal regional ombrófila densa e aberta. De estrutura vegetal diversificada, composta de espécies nativas adaptadas às condições climáticas e nutricionais, garante a sobrevivência, produtividade e sustentabilidade natural da floresta (MACHADO & PACHECO et al, 2010; LIMA et al, 2001).

Segundo Gama et al (2005) as matas de "terra firme" são descritas como florestas desprovidas de aspectos homogêneos em suas estruturas e composição florística. Quanto às áreas de inundações frequentes, localizadas nas várzeas e igapós, compõem-se de abundantes riquezas biológica e vegetacional em interface dos ecossistemas terrestre e aquático.

Em relação a formação geológica onde situa-se a floresta, a borda norte da Bacia do Amazonas é caracterizada como sedimentar intracratônica, aproximadamente 500.000km² de extensão, de preenchimento sedimentar e magmático de 5.000m de espessura, de configuração estrutural alongada no sentido ENE e WSW do Amazonas, Pará e Amapá, de oeste e leste das Bacias do Solimões e o Arco de Purus com a do Marajó (Figura 1) e o arcabouço estratigráfico dividida em duas megassequências: a paleozóica e a mesozóico-cenozóica (SANTOS, 2011; SOUZA et al, 2012; SILVA et al., 2003).

Segundo Cunha et al (2007), a subdivisão de ordem Paleozóica da bacia do Amazonas deu origem ao seguimento mesozóico-cenozóica, constituída de sucessões cretáceas e terciárias do Grupo Javari das Formações Alter do Chão e Solimões, formadas de arenitos médios a grossos avermelhados; arenitos médios a grossos caulíníficos de coloração branco-acinzentada; siltitos e argilitos de coloração avermelhada e conglomerados; de rochas sedimentares siliciclásticas de idade cretácea, de sistema deposicional flúvio-deltáico-lacustre (SOARES et al, 2016; BRITO, 2014; SOUZA et al, 2012; CUNHA et al, 2007).

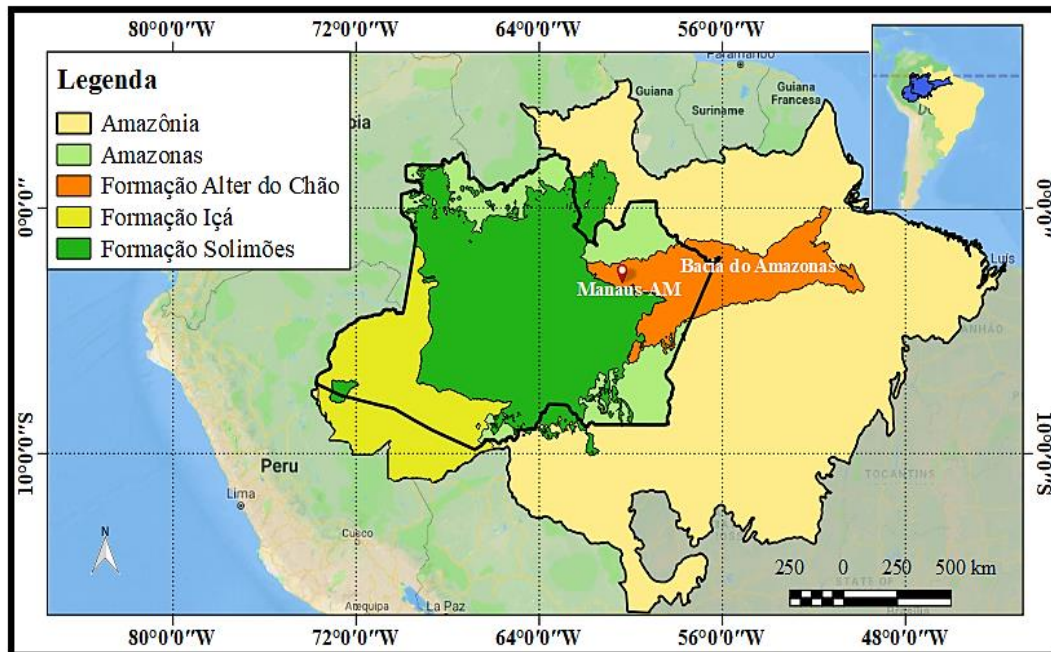


Figura 1. Mapa de localização da Bacia do Amazonas e seus limites geológicos.

Como indicado no mapa, a região da cidade de Manaus-AM, em relação a geomorfologia, localiza-se no domínio morfoestrutural do Planalto Dissecado Rio Trombetas-Rio Negro, parte sobre as rochas da Formação Alter do Chão, do Grupo Barreiras. O relevo é caracterizado de entalhamentos em formato de V, produzido pelas ondulações do terreno, com rede de drenagem do tipo dendrítico (BRITO, 2014; SOUZA, 2005).

O sistema aquífero da formação alter tem produção estimada de água explorável num total de 249,5m³/s que circulam entre a ilha de Marajó – PA, Manaus – AM, Santana – AP, Macapá – AP e Santarém – PA (ANA,2007), com boa capacidade de exploração de água subterrânea com alta a moderada produtividade (Figura 2). O nível freático, na região, situa-se em média a 25m de profundidade, escoar na direção predominante de NE para SW (AGUIAR et al, 2002). Quanto às características físico-químico-biológicas da água encontrada na bacia do Amazonas, onde situa-se nas planícies da bacia hidrográfica do Rio Negro, são classificadas como escuras e ácidas de pH entre 3,8 a 4,9 recorrente a vegetação, gêneses e solos arenosos ricos em material orgânico vegetal e animal (SIOLI et al, 1984), na decomposição da matéria orgânica, nos processos biológicos e químicos, liberam os ácidos húmicos e fúlvicos que elevam a acidez das águas e atribui cor mais escura (SILVA et al, 2013).

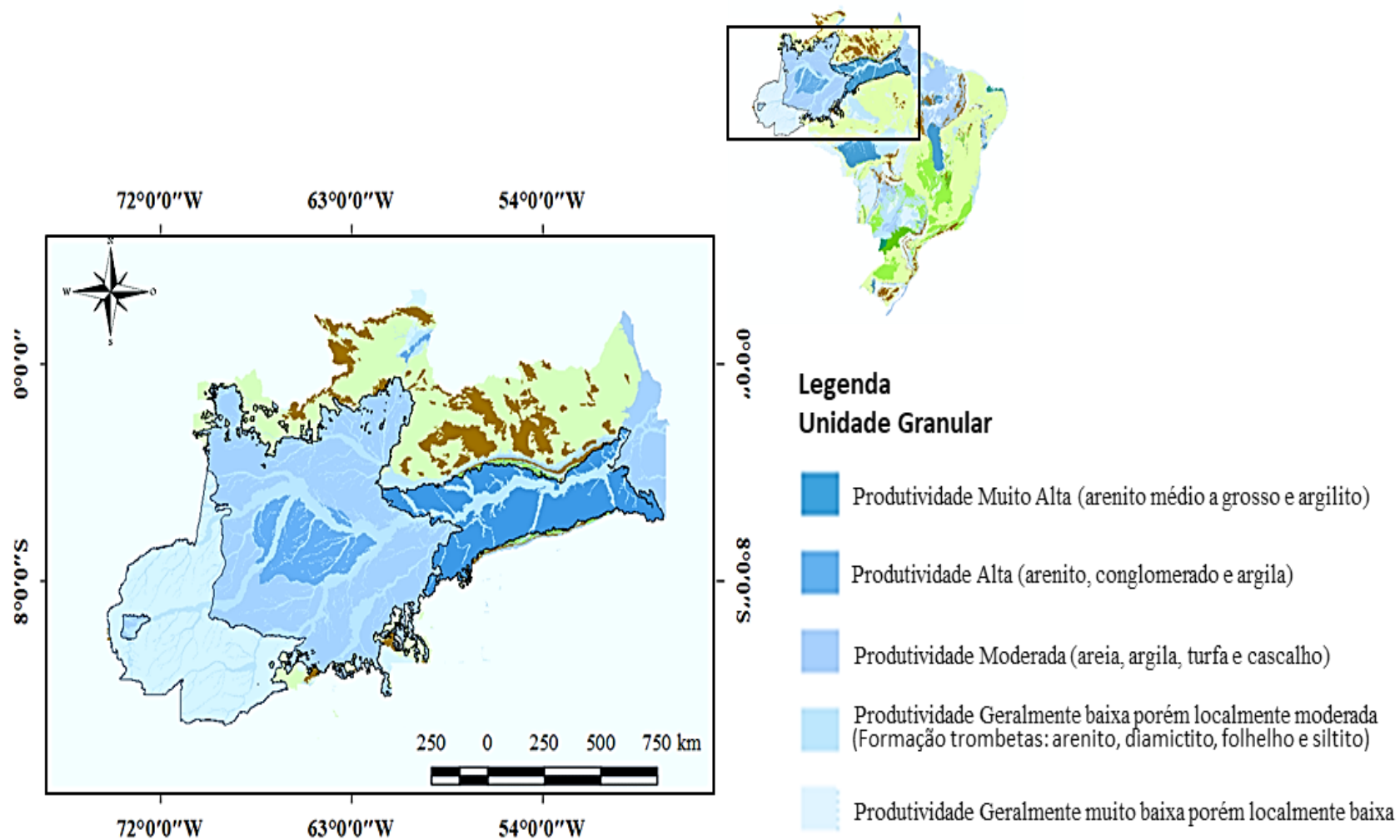


Figura 2. Hidrogeologia da Região norte do Brasil.
Fonte: (IBGE, 2015).

A planície amazônica, na Amazônia central, formou-se através da deposição de sedimentos fluviais com áreas antigas inundáveis tornando-se ao longo do tempo em regiões de terra firme e planícies de inundações encontradas em maior parte do território amazônico (GASNIER, 2007), com altitude de 0m a 185m (Figura 2). Em algumas áreas a superfície sofreu erosão de modo gradual natural resultando em diferentes níveis topográficos identificados e divididos em três partes:

- O platô, área praticamente plana;
- As encostas com ondulação acentuada;
- O baixo, plano e sujeito a inundações periódicas.

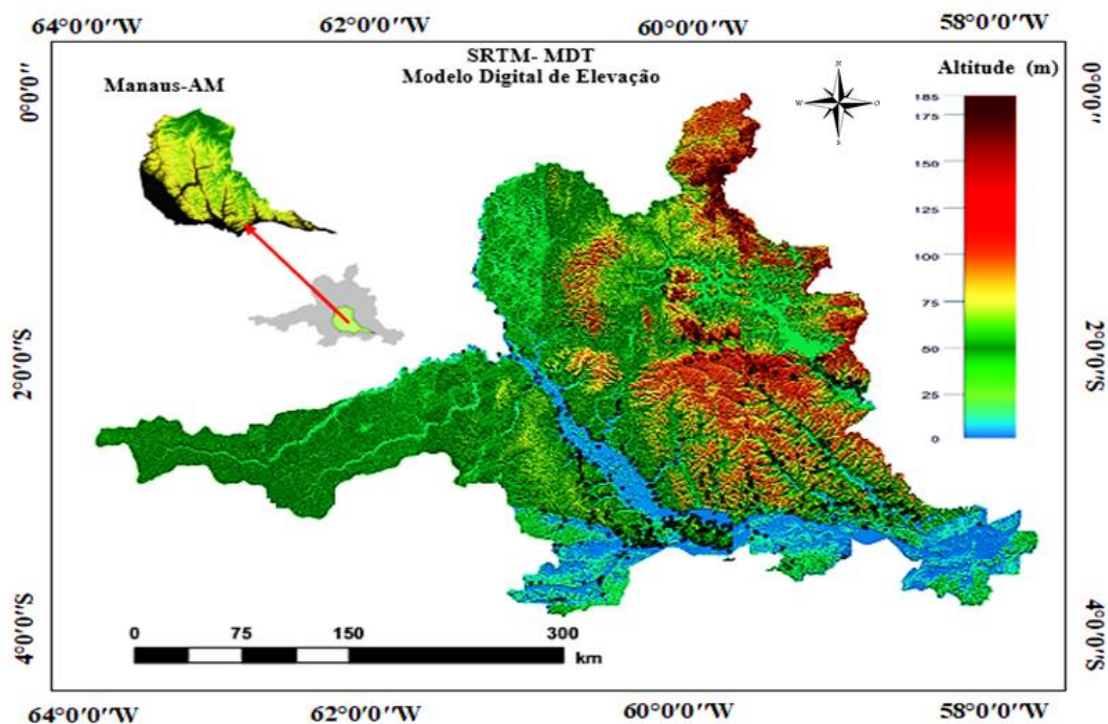


Figura 3: Elevação topográfica SRTM.
Fonte: Mapa (modificado de CPRM, 2016).

O fator topografia, de acordo com Whitmore (1975), pode justificar os tipos de solos formados. Guillaumet (1987) e Khan (1987) relatam que a composição florística e estrutura entre campina, campinarana e floresta de terra firme refletem nas diferenças físicas e químicas dos solos interligados às sequências topográficas.

Os sedimentos arenosos (pleistoceno) de areia branca quartzosa são de origem fluvial (RANZANI, 1980), mas grande parte da Amazônia é ocupada por sedimentos terciários na região de Manaus e, ao seu redor, grande ocorrência de vegetação que nasce sobre areia branca como campina e campinarana (CHAUVEL et al, 1982).

Segundo o trabalho pioneiro de Ducke e Black (1954) os solos das campinas amazônicas se originaram de antigos leitos dos rios associados a rios de água preta, pobres em sedimentos, e, conforme observação de Falesi et al. (1971) essas formações sempre ocorreram sobre solos arenosos num processo de podzolização. E as áreas próximas ao norte da região de Manaus-AM, situada entre os rios Negro e Trombetas, pertencentes à Formação Barreira ocupam grande parte da Amazônia. E a vegetação é caracterizada como densa e úmida e desenvolvem-se em latossolo amarelo (terras firmes e transições) e em fragmentos de solos do tipo arenito caulínico, onde localizam-se as campinas (CHAUVEL, 1981).

Os latossolos amarelos ocupam os platôs e as transições latossolo entre podzólicos e podzóis arenosos nas áreas de baixio (LUCAS *et al*, 1984) também encontrados nas encostas e nas terras firmes de locais específicos que estão ligados às redes fluviais inferiores na Bacia Média do Amazonas conforme as pesquisas pioneiras realizadas nas regiões dos planaltos e das altas elevações da região metropolitana de Manaus – AM (BRAVARD e RIGHI 1989,1990; LUCAS et al. 1987, 1996).

O movimento da água no solo é impulsionado pelas forças de atração, adsorção, capilares e gravitacionais que conduzem a água por meio dos poros vazios das rochas, fissuras e cavidades. As propriedades físicas do meio e as forças físicas permitem compreender a circulação da água no solo (CAICEDO et al, 2001).

A água subterrânea flui seguindo um gradiente de superfície potenciométrica com perda de carga de áreas com maior potencial para áreas de menor potencial sobrepondo-se às ondulações do terreno e às direções de fluxo (FREEZE & CHERRY, 2017).

Na zona saturada é possível, através da aplicação da equação de Darcy (1856), descrever o movimento da água subterrânea. O estudo de Darcy foi o primeiro a quantificar a densidade de fluxo em meio poroso saturado, em 1856, estudou o escoamento de água que atravessa um meio poroso, calculando as diferenças de potenciais e distância dos pontos da entrada a saída do fluxo em um experimento (Figura 3) (FERRAZ et al, 2015) .

Darcy observou que a descarga de cada filtro aumentava proporcionalmente à diferença de carga hidráulica entre os dois pontos (poços de monitoramento) e inversamente proporcional a condutividade hidráulica que varia de acordo com as características do meio poroso (AVILA, 2012; SIMMONS et al, 2008). Foi o primeiro experimento realizado que deu origem a lei de Darcy que correlaciona a taxa de perda de energia da água no solo com a sua velocidade de escoamento conhecida como a velocidade de descarga ou velocidade aparente (BRITO, 2014; FAJARDO et al, 2010; OLIVA et al, 2005) diferente da velocidade real da água avaliada nos vazios do solo.

A água subterrânea é um dos maiores recursos que mantém a vida na terra, sendo necessária para atividades biológicas e contribui para a evapotranspiração da vegetação e sustentação dos mananciais. Por meio de uma gestão estratégica para o uso das fontes de água, a partir de estudos de fontes subterrâneas nativa, é possível amenizar os impactos da poluição freática das grandes áreas urbanizadas para garantir a preservação ambiental (MCDONALD et al, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento da água na zona saturada do solo e o fluxo subterrâneo a partir de estimativas da condutividade hidráulica saturada do solo em áreas de vertente e baixo, em escala sazonal e interanual.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a condutividade hidráulica do solo saturado através de instalação de piezômetros distribuídos na área de estudo em diferentes níveis topográficos por meio de ensaios in situ;
- Analisar as flutuações do lençol freático através da correlação das séries históricas de piezometria (2003 a 2017) e pluviometria (2002 a 2018).
- Avaliar o comportamento sazonal do fluxo de água subterrânea em relação aos níveis topográficos

Capítulo 01

Estudo do comportamento do fluxo de água na zona saturada da reserva biológica do cuieiras,
Amazônia central

A. S. Bastos ^{1,a}, M. T. F. Monteiro ², S. J. F. Ferreira ^{2,3}; J. Tomasella ⁴; L. A. CANDIDO^{2,3}
N. C. Silva ¹, V. M. Teixeira ¹; R. C. Oliveira ¹ & A.G. M. Rebelo¹

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA SATURADA
DA RESERVA BIOLÓGICA DO CUIEIRAS, AMAZÔNIA CENTRAL**

**A. S. Bastos¹, M. T. F. Monteiro², S. J. F. Ferreira^{2,3}; J. Tomasella⁴; L. A. CANDIDO^{2,3};
N. C. Silva¹, V. M. Teixeira¹, R. C. Oliveira¹ & A.G. M. Rebelo¹**

¹) Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA/MCTIC, Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - PPG-CLIAMB, Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis - Campus I, CEP 69067-375, Manaus – Amazonas – Brasil. E-mail: alexandre3k39@gmail.com.

²) Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA/MCTIC, Programa de Grande Escala da Biosfera - Atmosfera na Amazônia – LBA, Coordenação de Pesquisas Hidrológicas – CPH, Grupo de Hidrobiogeoquímica, Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis - Campus II, CEP 69067-375, Manaus, Amazonas – Brasil.

³) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA/MCTIC, Coordenação de Dinâmica Ambiental – CODAM, Grupo RHANIA. Av. André Araújo, 2.936, Petrópolis, Campus I, CEP: 69067-375, Manaus, Amazonas, Brasil.

⁴) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais- CEMADEM. São Paulo. E- mail: j.tomasella@gmail.com

^a current address: Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Amazon State University, Amazonas, Brazil

* Correspondência: alexandre3k39@gmail.com; Tel.: +55-92-988095003

RESUMO

As informações sobre o comportamento do fluxo subterrâneo de altas a baixas altitudes na região amazônica, em ambientes naturais, quanto à velocidade e ao fluxo de base, ainda são incipientes e não refletem sua relevância atual relacionadas a dinâmica da água em diferentes níveis topográficos. Analisou-se o comportamento da água na zona saturada do solo, o fluxo subterrâneo a partir de estimativas da condutividade hidráulica em áreas de vertente e baixio, sob escala sazonal e interanual de 2003 a 2017, na reserva Biológica do Cuieiras na Amazônia Central ao norte da cidade de Manaus. Através de piezômetros distribuídos no local estimou-se os valores médios de condutividade hidráulica. Constatou-se alta heterogeneidade com variação de 30mm/h mínimo e máximo de 511mm/h; maior velocidade do fluxo em locais com alta condutividade e velocidade menor em áreas com baixa condutividade hidráulica saturada do solo. No baixio o nível oscilou numa frequência de 0,10m a 0.60m; na vertente de 3m a 5m e no platô de 23m a 42m de profundidade. No fluxo de base, no baixio, apresentou-se mais lento e variou de $1.00 \pm 4.20E-6m^3/s$. Considera-se importante que seja explorado esse resultado para caracterização de estudos complementares que envolvam a transmissividade, transporte de solutos, via subterrânea e recarga de aquífero livres consoante às sequências topográficas da região.

Palavras-chave: Variabilidade do lençol freático, condutividade hidráulica saturada e fluxo subterrâneo.

ABSTRACT

Information on the behavior of underground flow from high to low altitudes in the Amazon region, in natural environments, as to velocity and base flow, is still incipient and does not reflect its current relevance related to water dynamics at different topographic levels. The behavior of water in the saturated soil zone, the groundwater flow from estimates of hydraulic conductivity in slope and shallow areas, under seasonal and interannual scale from 2003 to 2017, in the Cuieiras Biological Reserve in the Central Amazon to the north was analyzed. From the city of Manaus. Through piezometers distributed on site, the average values of hydraulic conductivity were estimated. High heterogeneity was observed with a minimum and maximum variation of 30mm / h and 511mm / h; higher flow velocity in locations with high conductivity and lower velocity in areas with low saturated soil hydraulic conductivity. At the level the level oscillated at a frequency of 0.10m to 0.60m; on the slope from 3m to 5m and on the plateau from 23m to 42m deep. In the basal flow, the shoal was slower and varied from $1.00 \pm 4.20E-6m^3 / s$. It is considered important that this result be explored to characterize complementary studies involving the transferability, transport of solutes, and underground and free aquifer recharge according to the topographic sequences of the region.

Keywords: Groundwater variability, saturated hydraulic conductivity and groundwater flow.

INTRODUÇÃO

Embora não existam estimativas precisas do volume armazenado, que atravessa os aquíferos amazônicos, o IBGE (2011) estima que cerca de 45% da água subterrânea potável do país encontra-se na região amazônica, onde as maiores áreas de aquíferos porosos estão no Amazonas, em Mato Grosso e no Pará.

A água subterrânea é vital na sustentação dos rios e igarapés. Em períodos de extrema seca contribui com vazões mínimas através do fluxo de base e, em áreas próximas da superfície, mantém a umidade do solo que conduz a evapotranspiração (BROEDEL et al, 2017). Estes componentes e a precipitação caracterizam a entrada e a saída de água descrita no balanço hídrico, referente ao ganho e perda de água, por exemplo, de um ambiente natural e urbano, e assim permite uma gestão estratégica de controle e proteção nas zonas de recarga (WAKODE et al, 2018).

Segundo Souza & Verma (2006) em Manaus – AM, encontram-se duas zonas aquíferas da formação alter do chão: a primeira, com 50m de profundidade, constituída de camadas argilosas, arenosas e areno-argilosas e de dimensões variadas; a segunda, de 50m a 290m, com camadas mais arenosas e areno-argilosas, propícias ao armazenamento de água, favorecido pela capacidade de continuidade lateral, acentuada espessura e ao predomínio de corpos arenosos que viabilizam a drenagem da água e caracterizam a velocidade e direção do fluxo de água.

Desta forma, o acompanhamento das flutuações da água subterrânea em aquíferos livres é fundamental para propiciar instrumentos de gestão dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, tendo em conta que as variações significativas do nível subterrâneo influencia na quantidade de água disponível para as florestas e cidades (WAKODE et al, 2018; SOUZA et al, 2010); são poucas as informações, no Amazonas, do comportamento do fluxo subterrâneo em diferentes topografias analisados em piezômetros ou poços de monitoramento diante das taxas pluviométricas diário voltadas a circulação da água nos solos da região.

E para o tempo e velocidade do fluxo estimados em piezômetros, se destaca a condutividade hidráulica (K) que representa uma medida da capacidade do solo em conduzir água em seus intersídios usado nos cálculos de fluxo de água, sendo uma propriedade importante, na hidrogeologia, para descrever o transporte de solutos, transmissividade, o nível de vulnerabilidade dos aquíferos e dos poluentes que atingem o nível freático e os corpos hídricos que são essenciais nos estudos hidrodinâmicos (OLIVIA et al 2005; KALBUS et al, 2007; FERRAZ et al, 2015; FARJADO et al; AMELI et al, 2016; MIRANDA, 2017; MENDES et al, 2019).

Este estudo analisou séries históricas de dados piezométricos, de precipitação e velocidade do fluxo subterrâneo a partir de estimativas pioneiras da condutividade hidráulica, na zona saturada do solo local, para compreender o comportamento dos processos hidrológicos numa microbacia de floresta nativa na escala sazonal e interanual.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O sistema de monitoramento do nível freático foi instalado em 1999, na bacia hidrográfica do Rio Cuieiras, localizada ao norte de Manaus – AM a 50km, latitude $2^{\circ}35'21,08''S$ e longitude de $60^{\circ}06'53,63''W$, na microbacia do Igarapé-Asú (Figura 4), com uma área de drenagem de aproximadamente 14.800Km^2 de extensão na reserva Biológica do Cuieiras na zona florestal 2 (ZF-2).

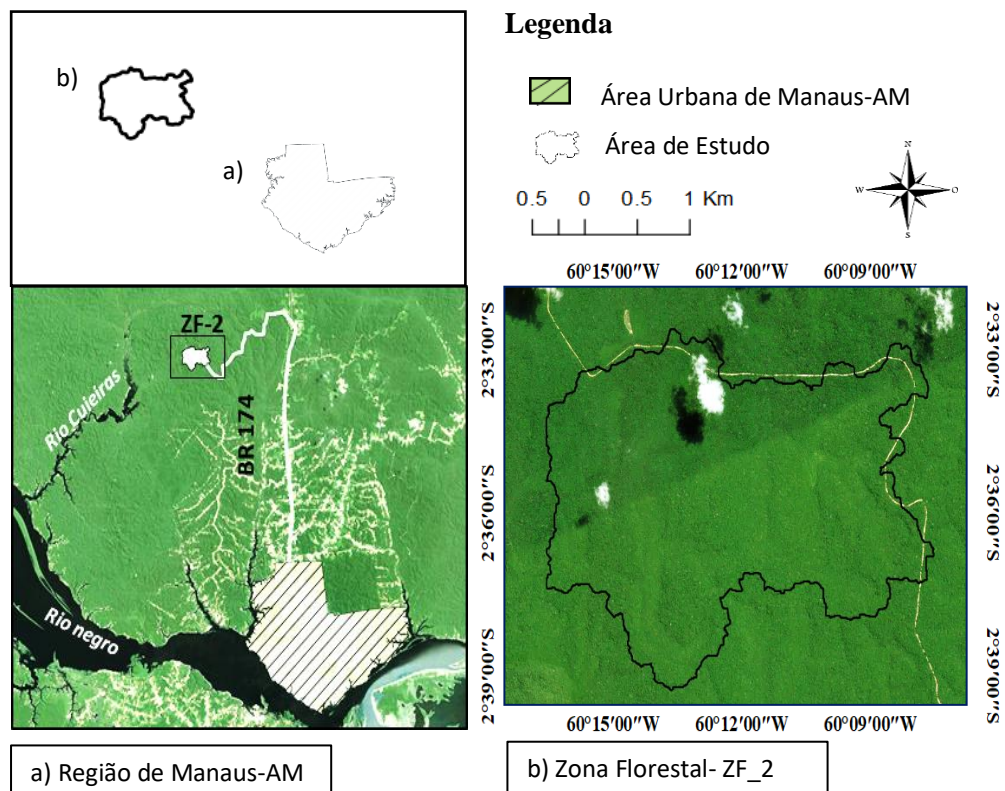


Figura 4. Imagem de satélite da cidade de Manaus-AM e os limites da Reserva biológica do Cuieiras.

Topográfica (platô, vertente e baixio)

Caracterizou-se a projeção 3D de elevação da microbacia do Igarapé-Asú utilizando-se as cotas e coordenadas geográficas extraídas de imagens de satélite de 1m de resolução, através de programas arcgis e origin 10 (Figura 5-A) e, em destaque, a trilha dos piezômetros na área de estudo conhecida como Seção 2.

A topográfica do local constitui diferentes sequências topográficas, tais como: o platô com 90m a 70m de altitude, onde situa-se a torre K-34 para observações de precipitação diária através de um pluviógrafo; as encostas de 50m a 70m, ambos na porção norte e sul do terreno e na porção central o baixio com elevações sutis entre 33m e 50m de altitude (Figura 5-B).

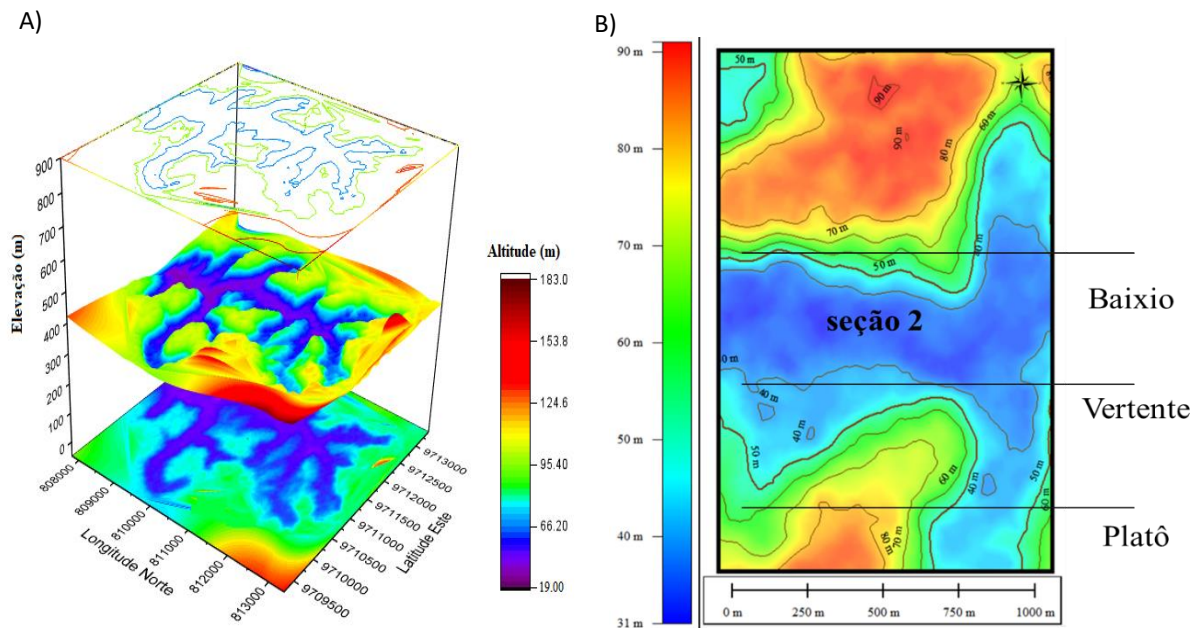


Figura 5. A- Mapa 3D da microbacia e B- seção transversal.

Os ensaios de campo foram realizados nos piezômetros na seção 2 instalados distribuídos e estudados para os ensaios de determinação da condutividade Hidráulica na zona saturada do solo, ao longo do transecto em 800m de distância do baixio ao último piezômetro em área de platô, na direção norte-sul, em relação ao curso d'água (Igarapé-Asú) à torre k-34 (referência de localização).

Geologia e Solos

A área de estudo, em relação a geologia e geomorfologia, situa-se no domínio morfoestrutural, desenvolve-se sobre os sedimentos terciários e quaternários, pertencentes a formação Alter-do-Chão, do Grupo Barreiras. O relevo é caracterizado por entalhamentos formando um V, produzido pelas ondulações do terreno, com rede de drenagem do tipo dendrítico resultando em planaltos, vales e várias encostas (DIAS et al. 1980; RANZANI 1980; SOUZA, 2005; GASNIER, 2007; CUNHA et al. 1994, 2007; BRITO, 2014).

Nos platôs o solo é classificado em latossolos amarelos Álicos, argilosos em horizonte médio, poroso, microagregado, com dois horizontes de menor porosidade, ocupam as transições entre os latossolos presentes entre podzólicos e podzóis; neossolos hidromórficos nos baixios e os podzóis Vermelho-Amarelo nas encostas encontrados nas terras firmes de regiões específicas ligados às redes fluviais inferiores na Bacia Média do Amazonas dos planaltos e das altas elevações da região, conforme estudos pioneiros realizados na Amazônia central (CHAUVEL, 1982; LUCAS et al, 1984; BRAVARD e RIGHI, 1989, 1990; LUCAS et al. 1987, 1996; FERAZ et al., 1998; CARNEIRO, 2004), sendo os latossolos e argisolos o mais identificados na Amazônia (CAMARCZO & FALESI 1975; SANCHEZ, 1976; RICHTER & BABBAR, 1991).

A vegetação local configura-se do tipo tropical úmida de terra firme, com vasta diversidade de espécies lenhosas e herbáceas e características de floresta primária preservada (HIGUCHI et al., 1998). Na área do platô encontram-se árvores que atingem de 35m a 40m; a Vertente de 25m a 35m e o baixio de 20m a 30m de dorsel (OLIVEIRA & AMARAL, 2004; MARQUES et al, 2015). A quantidade de nutrientes para as plantas é muito baixa, e os solos são classificados como distróficos (CARNEIRO, 2004).

Determinação da Condutividade Hidráulica saturada (k)

Na determinação da condutividade hidráulica, foram realizados dez ensaios em cada piezômetro, totalizando cerca de 100 repetições durante os meses de maio, julho, novembro e dezembro de 2018 e maio de 2019.

Para a condutividade hidráulica saturada foi utilizado o “slug test” em poços de monitoramentos (piezômetros) de pequeno diâmetro de 5cm, inserindo um objeto cilíndrico de 1.20m de comprimento preenchido com água, diâmetro de 4.5cm e peso de 1000cm³ (1,5 litros aproximadamente). Através desta instrumentalização procurou-se identificar a diferença de potencial hidráulico do interior do poço parcialmente penetrante no aquífero livre e suas circunvizinhanças com a introdução do slug para causar desequilíbrio na carga hidráulica, assim monitorar a recuperação da coluna d’água ao nível estático.

A diferença de potencial gerada ao inserir (slug) causa a subida instantânea do nível ou na retirada (slug) o rebaixamento. O ensaio acompanha todo o tempo com auxílio de um sensor LGR da HOBOnset (range 0m a 50m) submerso até o final da base do tubo, gera automaticamente as curvas dos ensaios, registra, em intervalos de tempo, o nível da água à

medida que este desce ou sobe, até o nível estático recuperar as condições iniciais (KALBUS et al, 2007; FARJADO et al, 2010; FERRAZ et al, 2015).

Com o T encontrado (varia a cada ensaio) e mais as formas e dimensões geométricas dos piezômetros (constantes) juntos fornecem o valor de condutividade hidráulica (DAWSON et al, 1991), por meio da equação do método de Hvorslev (1951):

$$k = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0}$$

Sendo (r) raio do diâmetro do tubo; o comprimento (L) da seção filtrante de poços parcialmente penetrantes e o raio do revestimento (R) se houver, onde neste caso $r=R$ e o $T_0=0,37=T$ definido por Hvorslev, como sendo o tempo necessário para igualar as diferenças de pressão (retornar ao nível estático) para piezômetros com $L/R > 8$ (FREEZE e CHERRY, 2017), vide Figura 6.

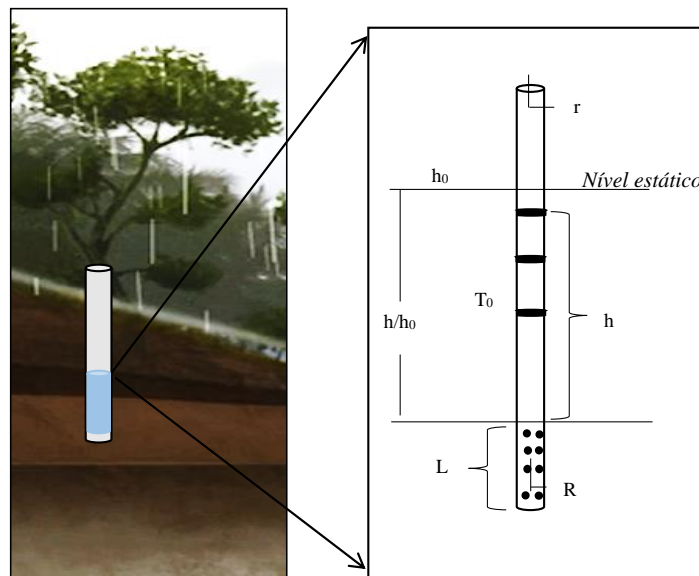


Figura 6: Parâmetros geométricos dos piezômetros necessários para a equação de Hvorslev (Modificado de Farjado et al, 2010).

Cálculo da velocidade do fluxo subterrâneo

Para o cálculo do fluxo subterrâneo tem-se os dados das cotas de elevação da superfície altimétrica dos piezômetros in situ, e junto com as leituras do nível estático foi possível determinar a carga hidráulica na seguinte fórmula:

$$h = ES - Dw, \text{ onde:}$$

h: carga hidráulica;

ES: elevação da superfície

Dw: leitura do nível do piezômetro;

Com a carga hidráulica e a distância entre os pontos tem-se calculado o gradiente hidráulico da lei de Darcy na seguinte equação:

$$I = \frac{h_2 - h_1}{dl}, \text{ onde:}$$

dh: Carga 2- Carga 1;

dl: distância dos pontos.

Para o cálculo da velocidade Darcyana aplica-se a seguinte equação:

$$q: - K \cdot I, \text{ onde:}$$

q: velocidade de Darcy;

K: constante de proporcionalidade ou condutividade hidráulica;

i: gradiente hidráulico ($i: dh/dl$), sendo (dh) variação da carga hidráulica e (dl) a distância entre os piezômetros.

Limites da água subterrânea

O monitoramento do lençol freático foi feito em 13 piezômetros, mas só foi possível determinar as condutividades hidráulicas saturada para 10 piezômetros a partir da vertente ao baixo. Os piezômetros foram inseridos próximo do curso d'água, 1.5m a 2.5m de profundidade no baixo, no total de seis; dois na vertente de 5m a 5.5m; e três no platô de (30m a 54m), distante do igarapé de 7m a 783m, e o nível topográfico variou conforme a localização dos piezômetros de altitudes entre 33m a 82,5m. O fluxo parte da direção WO para NS e SN das cotas mais elevadas para as mais baixas, perpendicular às superfícies equipotenciais, expressam, em geral, a descarga do aquífero livre na direção ao curso d'água na área mais baixa do terreno.

Os piezômetros da vertente ao baixo instalados são tubos de PVC de 50mm de diâmetro interno, filtros de ranhuras de 1,5m de comprimento (L) e um piezômetro, instalado em 2019,

com filtro de furos de 7mm e filtro de 45cm de comprimento (L), coberto por tela de nylon com três voltas sobre o filtro e no platô tubos de PVC de 15cm de diâmetro interno e sem base e filtro.

Ao longo do transecto dos piezômetros, na seção 2, encontra-se uma torre identificada como K-34 (Figura 7), onde foram obtidos os dados de precipitação observado da microbacia do Igarapé-Asú para correlação com o nível freático.

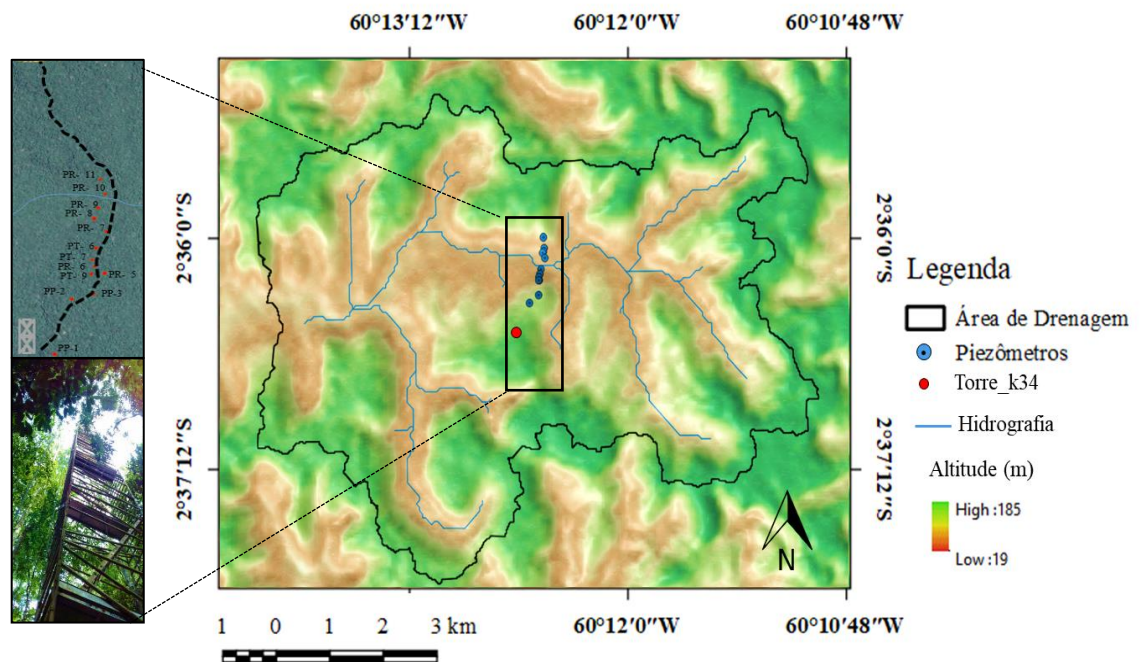


Figura 7: A- Torre K-34 e B: Pluviógrafo e área de localização da torre e do transecto dos piezômetros.

Análise de dados

Os dados de monitoramento de uma série histórica do lençol freático de 2003 a 2017, com exceção do biênio 2010-2011, e a precipitação ocorrida entre 2003 e 2017 foram fornecidos pela Coordenação de Pesquisas Hidrológicas – CPH/LBA obtido através do site (<http://lba2.inpa.gov.br/>) no Instituto de Pesquisa da Amazônia – INPA, responsável pelas atividades de campo.

A precipitação (mm), o nível do lençol freático e a condutividade hidráulica saturada do solo foram analisados estatisticamente. A análise exploratória foi feita no programa **r** e no Excel para analisar o banco de dados, identificar valores extremos e aproximação dos dados. Para a análise sazonal de precipitação e piezometria foram analisadas através de médias diárias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise do nível freático

A análise da variação do nível freático, de 2003 a novembro de 2016, monitorada nos piezômetros, está demonstrada na Figura 8.

As flutuações do nível da água subterrânea dos piezômetros do baixio mostram os níveis oscilando de 0m a 2.5m; na vertente de 2.5m a 4.5m e no platô de 23m a 38m. Percebeu-se um comportamento uniforme com picos e recessões. No platô avaliado de 2003 a 2009 os níveis estão distantes com 5m de profundidade entre o PP03 (Poço profundo 03), PP02 e 15m de diferença no PP01.

Os pulsos de ondas contínuas, com frequências multivariadas, variam diante do regime pluviométrico. A evapotranspiração direta, presença de eventos climáticos, sazonalidade anual da precipitação e a pressão barométrica são agentes influentes no comportamento do fluxo subterrâneo que podem afetar a assimetria das ondas oscilatórias subterrânea (SILVA & LOREIRO, 2006). Em determinado período, por questões técnicas, alguns piezômetros foram desativados e reativados, o que implicou nas variações temporais do nível.

Os gráficos A, A.1, B e C representam a frequência absoluta (F_i) e as classes de níveis mostram a quantidade de repetições da medição no nível freático e sua distribuição.

No baixio (A) os valores medidos de maior proporção oscilaram de 2003 a 2016 nas classes de níveis entre 0m a 0,20m próximo da superfície; e no baixio (A.1) de 0.5m a 1.5m com frequência de 10 a 40 amostras onde as curvas são mais largas e representam a maior quantidade de dados observados; na vertente de 3m a 4.80m e no platô de 23m a 27m (PP3), 28m a 30m (PP02) e 33m a 38m (PP01) com frequência de 0 a 25 amostras respectivamente.

Na Figura 8, ainda, no gráfico de linhas, a ação da sazonalidade climática influencia na dinâmica de oscilações do nível estático nos piezômetros. Observa-se, na área do baixio (Figura 8.A e A.1) os piezômetros (PR09, PR8, PR7, PR11, PR10, PT7, PT6 e PR6) apresentaram as maiores flutuações da lâmina do nível freática influenciado pelo regime pluviométrico anual e a proximidade do curso d'água e da superfície terrestre, em comparação aos piezômetros da área de vertente (Figura 8. B) e platô (Figura 8. A).

Esse comportamento estima-se que decorre das alturas em que o nível atinge próximo ao igarapé resultado do acúmulo de chuvas e pelas características dos solos da área do baixio serem hidromórficos, portanto, facilita a elevação do nível freático onde mesmo durante período de escassez de chuvas é possível registrar altas flutuações.

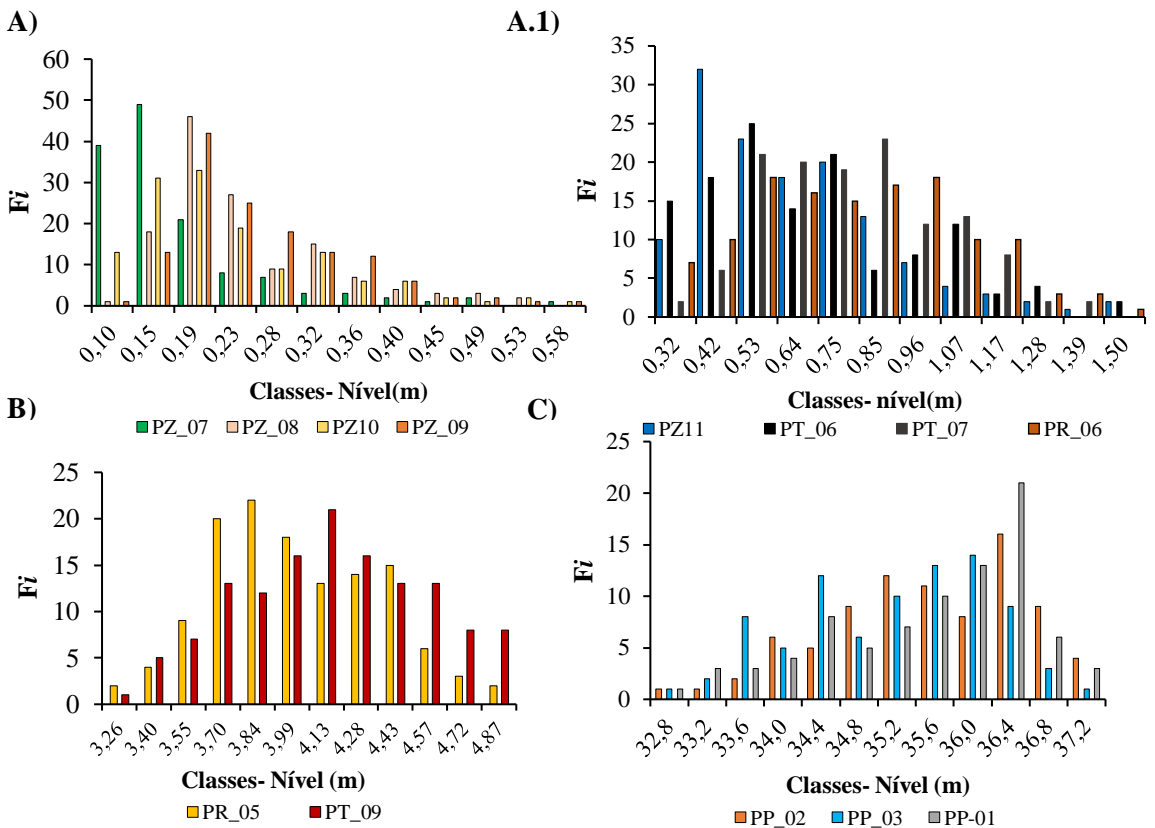
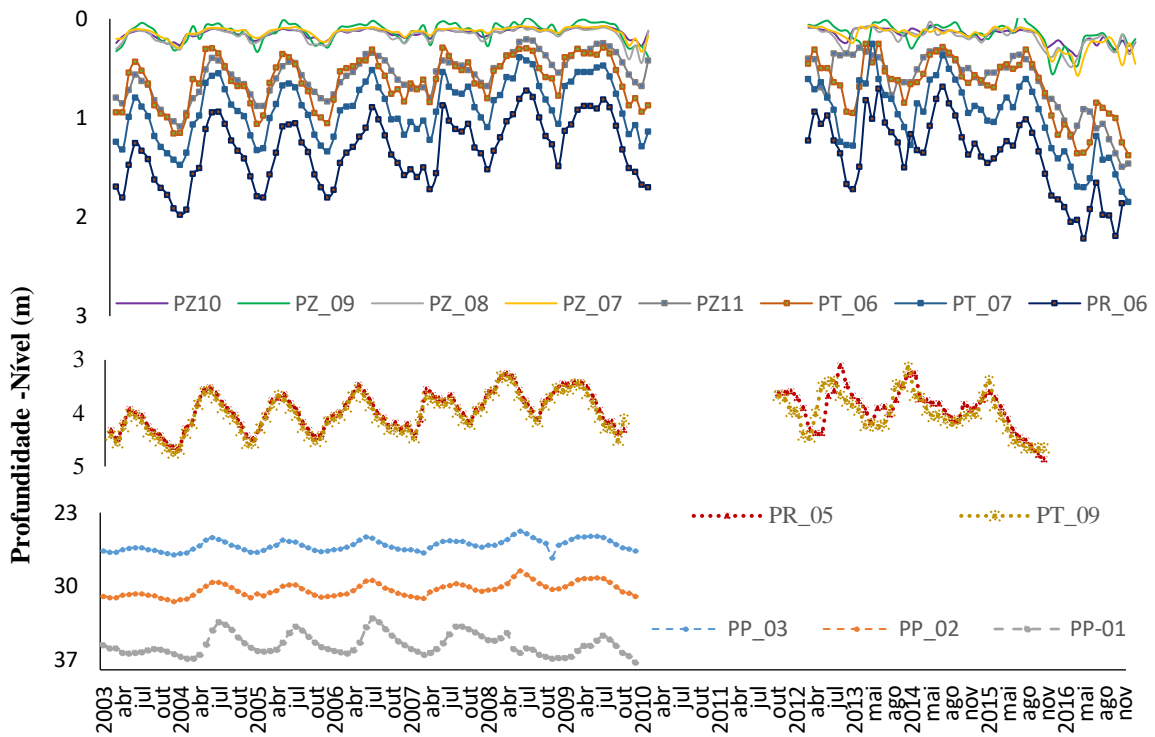


Figura 8: Variação sazonal e interanual do nível freático e análise quantitativa da distribuição dos dados de medição taqueométrico da série histórica de 2003 a 2016; A- 4 piezômetros (PZ) do baixo; A.1 - 4 piezômetros (PZ) do baixo continuação; B: 2 piezômetros (PZ) da vertente e C: 3 piezômetros (PZ) no platô.

Os níveis do lençol freático no PZ_09 e PZ_10 (margens do igarapé) apresentaram as maiores elevações absolutas entre -0.60m (negativo) acima do solo quando ocorre inundação no

local 2003 a 2016 e 0.80m de profundidade em 2015 a 2016 (El Niño) o maior rebaixamento registrado na série histórica, representa uma taxa de ascensão anual de 0.20m e 0.60m, durante um período de 12 anos (Janeiro/2003 a Novembro/2016); para dados taqueométricos no baixio e na vertente de 3,5m a 4,50m e no platô de 21m a 40m para 7 anos (Janeiro/2003 a Dezembro/2009), sendo o PR_9 com 7m de distância e influência direta do curso d'água em que há maiores elevações e depleções em curto espaço de tempo definido pelo regime hidrológico do Igarapé.

Relação da precipitação e Nível freático

A partir da análise da variabilidade sazonal, das séries de precipitação de seis pluviômetros, distribuídos na microbacia do Igarapé-Asú, e da média climatológica de 16 anos de dados observados, obteve-se a temperatura máxima (34°C) e a mínima (23°C), e a precipitação média (2053mm) do ciclo sazonal (Figura 9), para a microbacia, confirmando esses resultados com trabalhos anteriores mostrando os períodos de meses chuvosos (dezembro a maio) e de seco (Junho a Novembro) (DEBORTOLI et al, 2012; CUARTAS et al, 2007).

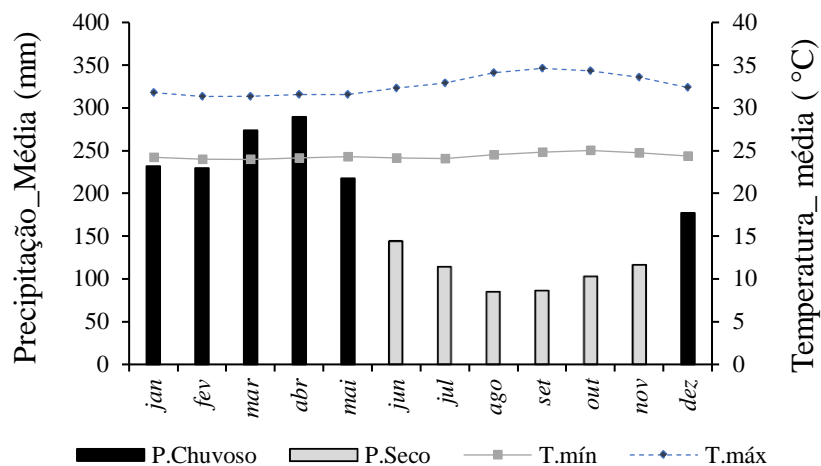


Figura 9: Média climatológica da microbacia do Igarapé-Asú.

Na Figura 10 destaca-se a série histórica de precipitação acumulada anual para a área de estudo e os anos com ocorrência de anomalias (barras em preto). O biênio 2004-2005, início do verão austral, foi marcado pelo aquecimento no Atlântico Norte Tropical; o período 2009-2010 foi marcado pela extrema seca, generalizada na floresta Amazônica, mais severa do que a seca de 2004-2005 (MORENGO et al, 2011) e, entre 2015 e 2016, a área foi atingida pelo fenômeno El Niño na escala $\geq 2,0$ considerado muito forte (ONI, 2016). Esses anos identificados com anomalias impactam de forma indireta na dinâmica dos recursos hídricos da região.

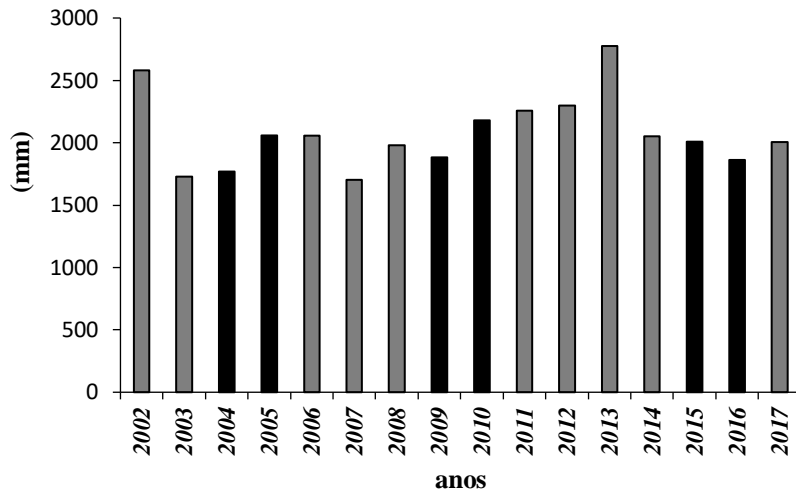


Figura 10. Média anual da precipitação acumulada (mm) para a área de estudo.

As anomalias registradas não causaram impacto considerável no nível freático para a área de estudo. Mas, ao relacionar a precipitação com o comportamento do nível freático, do baixo e da vertente, nota-se uma resposta instantânea para os eventos de chuvas intensas que indicam os picos das curvas, com movimentos contínuos ascendentes e descendentes, de 2003 a 2017. Porém, no biênio 2015-2016 o nível subterrâneo esteve abaixo do normal em relação aos outros anos, possivelmente a estação seca de 2015 prolongou-se devido ao el Niño e alterou o regime pluviométrico do início da estação chuvosa de 2016. Entretanto, no ano de 2017 com dados automáticos o nível restabeleceu-se (Figura 11).

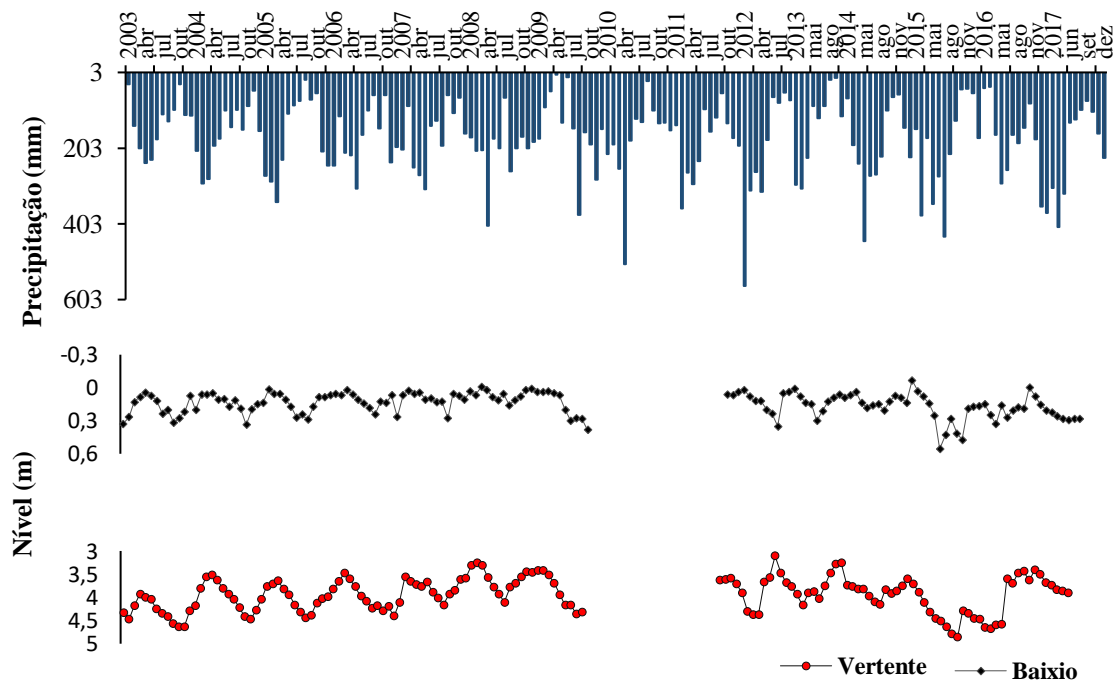


Figura 11: Precipitação e Nível lençol do freático de 2003 a 2017.

Os movimentos ascendentes e descendentes coincidem com a estação chuvosa da torre K-34 que determina o mais próximo a ascensão média do nível subterrâneo no baixio e na vertente. Isso baseia-se após ao término do período chuvoso, posterior a redução do nível da água nos piezômetros, e o declínio piezométrico ocorre de forma lenta da zona de recarga à zona de descarga. comportamento este semelhante analisado por Fontes Júnior et al (2012) num aquífero aluvial e Andrade et al (2016) no Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú. Segundo Andrade et al (2016), os poços inseridos em área de influência direta do rio Ariaú, caracteriza a inversão do fluxo da recarga e descarga provindo das cheias e secas.

Na área de estudo os pulsos de ondas oscilatórios são semelhantes, mas no baixio o nível está sempre próximo da superfície oscilando de 0.03m a 0.60m e na vertente de 3.5m a 5m em média.

Parâmetros de condutividade hidráulica saturada (K)

Os resultados da condutividade hidráulica indicaram alta variabilidade entre os pontos amostrais (Figura 12).

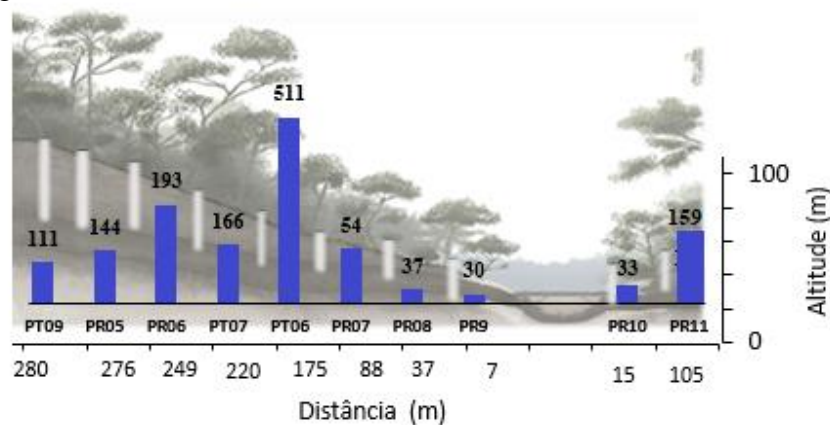


Figura 12: Variabilidade da condutividade Hidráulica saturada do solo.

No baixio as medidas mais baixas de condutividade hidráulica foram de 30mm/h a 54mm/h nos PR_10, PR_09, PR_08 e PR_07; nos PR_11, PT07 e PR_06 de 159mm/h a 193mm/h, e na vertente de 111mm/h a 144mm/h nos PT_09 e PR_05. O piezômetro taqueométrico PT_06 indicou o maior valor em 511mm/h. Neste ponto, a 1.80m de profundidade, é provável, que esteja inserido num solo arenoso com partículas menos finas, como também a presença de raízes próximos do piezômetro que podem abrir caminhos aumentando a porosidade e assim elevar a condutividade hidráulica neste ponto.

Para fins de comparações dos resultados de condutividade hidráulica saturada do solo, trabalhos como de Ferreira et al (2002), realizados na Amazônia central, em Latossolo Amarelo

encontraram condutividade hidráulica de até 42,7mm/h; já Tomasella e Hodnett (1996) em profundidades de 30cm e 97cm determinaram condutividades variando entre 17mm/h, 66mm/h e 97mm/h em área de pastagem; Farjado et al (2010) encontrou valores de 78mm/h a 113mm/h em 205cm e 265cm e 217mm/h a 287mm/h em profundidades de 90cm a 110cm em linhas transversais ao curso d'água. Valores acima de 30mm/h de condutividade hidráulica são considerados muito alto (REICHARDT, 1990).

Segundo Miranda (2017) na caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero alter do chão estimou em 56 poços de monitoramento do nível freático distribuídos na cidade de Manaus-AM em varias profundidades (21 a 228m) valores de condutividade hidráulica saturada variando entre 4m/dia e 12m/dia (170mm/h e 500mm/h) em diferentes camadas litológicas aproximando-se com os resultados anteriores obtidos nos mesmos poços da cidade no trabalho de Aguiar (2002), onde a predominância de valores abaixo de 4.1m/dia indica índices de baixa vulnerabilidade do aquífero. Percebe-se que os resultados são semelhantes da condutividade hidráulica saturada do solo estimado na Microbacia do Igarapé-Asú, porém em camadas do solo mais superficiais, provavelmente considerando ser o mesmo tipo de aquífero e formação geológica (alter do chão) que engloba tanto a região de Manaus – AM como na ZF-2 e os valores estimados não se diferenciam tanto, dependendo principalmente da estrutura do solo e direção do fluxo para outras camadas.

Na Figura 13 apresenta-se a média das curvas obtidas da variação de h/h_0 e t (tempo) dos piezômetros de referência na vertente (PR_05) e o baixio (PR_09). A partir dos gráficos nota-se o tempo t (s) indicado na escala h/h_0 (0,37), refere-se ao tempo de retardo básico necessário para determinação das condutividades hidráulicas. O tempo para 37% de recuperação, encontrado com maior velocidade, ocorreu nos piezômetros instalados próximos da vertente que varia de 6s a 35s e mais lento no baixio próximo ao igarapé de 61s a 476s.

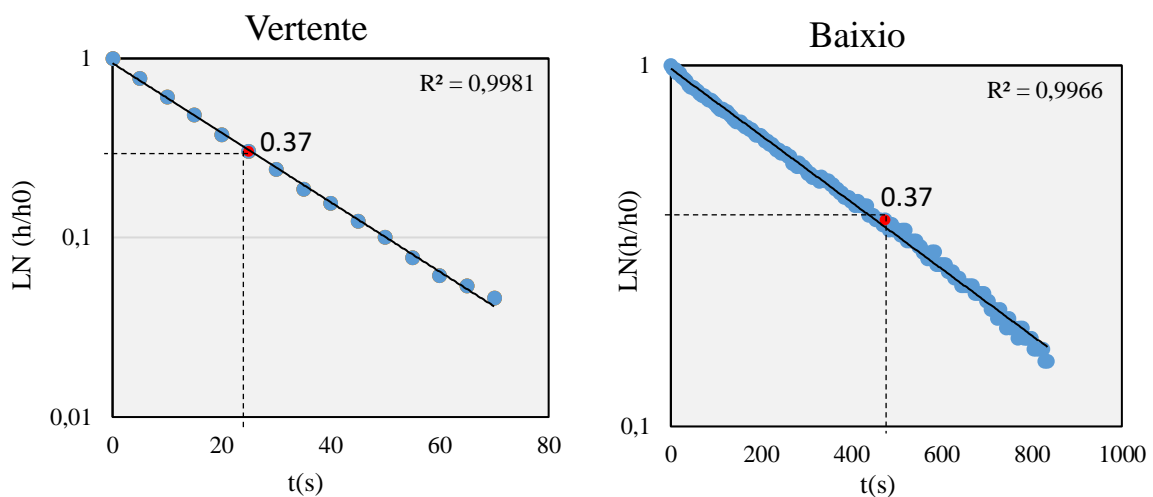


Figura 13: Curvas médias de referência dos ensaios slug test para terminar o tempo de retardo.

Os valores médios para condutividade hidráulica do solo saturado total foram de 144mm/h, com desvio-padrão de 125.6mm/h e coeficiente de variação de 87%, estes evidenciaram a alta heterogeneidade dos dados, e podem variar de 48% a 320% na zona saturada do solo (JURY et al, 1991).

De acordo com Scherpinski et al (2010) a tendência deste parâmetro é variar bastante em função das variações estruturais das camadas do solo. Além disso, o tempo de retardo encontrado variou, T(s) de 7 a 476.2s e bons resultados dos coeficientes de determinação (r^2) em valores médios (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise exploratória dos dados de condutividade Hidráulica.

PZ	T(S)	R ²	ESTATÍSTICA	K(MM/H)
PR11	18.8	0.995	N.P amostrais	10
PR10	111.1	0.998	N.R	10
PR9	476.2	0.997	Média total	144
PR8	87.0	0.999	mínimo	30
PR7	61.3	0.998	máximo	511
PT6	7.1	0.997	desvio padrão	125.6
PT7	12.7	0.991	CV (%)	0.87
PR6	20.1	0.997		
PR5	25.7	0.997		
PT9	35.2	0.999		

*Obs.: PZ: Piezômetros; T(S): tempo (T_0); R²: coeficiente de determinação; K: condutividade hidráulica. N.P: Número de Piezômetros amostrais; N.P: Número de Repetições.

Parâmetros do fluxo subterrâneo

O gradiente hidráulico calculado da superfície piezométrica mostrou um gradiente inversamente proporcional a condutividade hidráulica variando de 0.02 mm/h \pm 0.14mm/h. A maior velocidade de fluxo parte da vertente inferior dos piezômetros PT-09 e PR-05, e o fluxo subterrâneo, ao longo da espessura do aquífero livre, torna-se menor próximo do curso d'água. O valor médio da velocidade entre os pontos foi de 1.28E-6m/s e fluxo de base, ao longo do comprimento e largura do corpo hídrico na zona de descarga, foi de 2.37E-04m³/s (Tabela 2).

Na vertente o fluxo de água, que inicia do potencial maior para o menor, delineia um seguimento de fluxo de potenciais diferentes, num traçado perpendicular às linhas equipotenciais, e as diferenças de potencial de dois pontos, dada uma distância lateral constante,

fazem com que maior seja a velocidade do fluxo. De acordo com (PAULETTO et al., 1988) a dificuldade na estimativa do fluxo subterrâneo reside na determinação da condutividade hidráulica do solo tanto saturado como insaturado que varia com a direção do fluxo.

Tabela 2: Resultados obtidos para o fluxo subterrâneo.

PZ	K(mm/h)	I: ($\Delta h/l$)	q:k. i (m/s)	q:q. a (m ³ /s)
PR11	159.1	0.0638	2.8E-06	3.9E-04
PR10	33.0	0.1000	9.2E-07	1.8E-05
PR9	30.4	0.1429	1.2E-06	1.1E-05
PR8	37.7	0.0296	3.1E-07	1.5E-05
PR7	54.6	0.0508	7.7E-07	8.8E-05
PT6	511.8	0.0267	3.8E-06	8.6E-04
PT7	166.2	0.0155	7.2E-07	2.1E-04
PR6	193.3	0.0165	8.8E-07	2.9E-04
PR5	144.7	0.0197	7.9E-07	2.9E-04
PT9	111.7	0.0190	5.9E-07	2.1E-04
MÉDIA	144.3	0.048	1.28E-06	2.37E-04

*Obs.: PZ: Piezômetro; K-Conductividade hidráulica; q: Velocidade aparente; Q: fluxo de base.

O fluxo de base variou em torno de $2.1 \pm 8.6 \text{ E-}4 \text{ m}^3/\text{s}$ na vertente e no baixio entre os piezômetros de 105m a 280m de distância do igarapé (PR_05, PT_09, PR_06,PT_07, PT_06 e PR_11), e os menores valores encontrados oscilaram de $1.1 \pm 8.6 \text{ E-}5 \text{ m}^3/\text{s}$ no baixio (PR_10,PR_09,_PR_08 e PR_07) de 7m a 88m de distância (Figura 14).

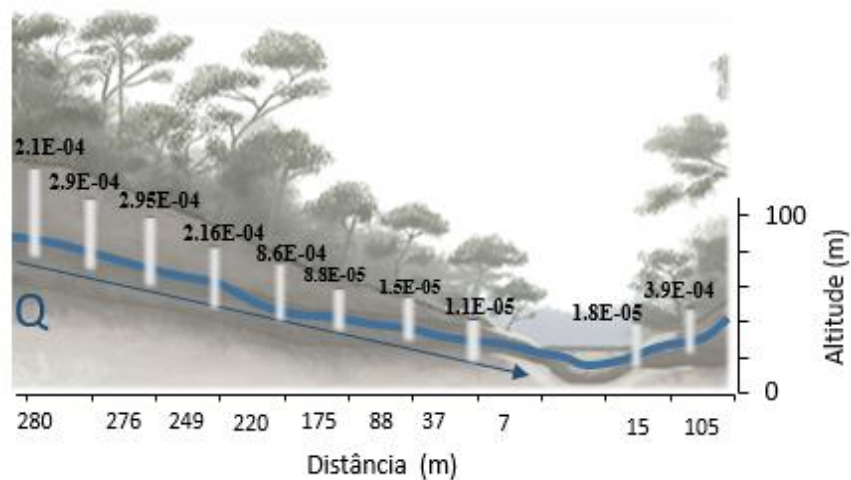


Figura 14: Valores médios do fluxo de base da vertente ao baixio.

A Figura 15 demonstra a variabilidade sazonal e interanual do fluxo de base médio dos piezômetros do Baixio que variou de $1.00 \pm 4.20E-6 \text{ m}^3/\text{s}$ para os anos de 2003 a 2017. O fluxo de base estimado é o mais próximo da zona de descarga aquele que já passou por várias obstruções causadas pela geologia, solos e relevo local. Nesta área topográfica, o fluxo tende a ser mais lento, por isso é determinante nas estimativas da contribuição subterrânea com vazões mínimas (fluxo de saída) para outros sistemas hídricos e, com menor condutividade hidráulica saturada, possivelmente, é um dos fatores que controla a exploração de água para outros sistemas lentamente e por justificar a durabilidade do volume do igarapé o ano todo.

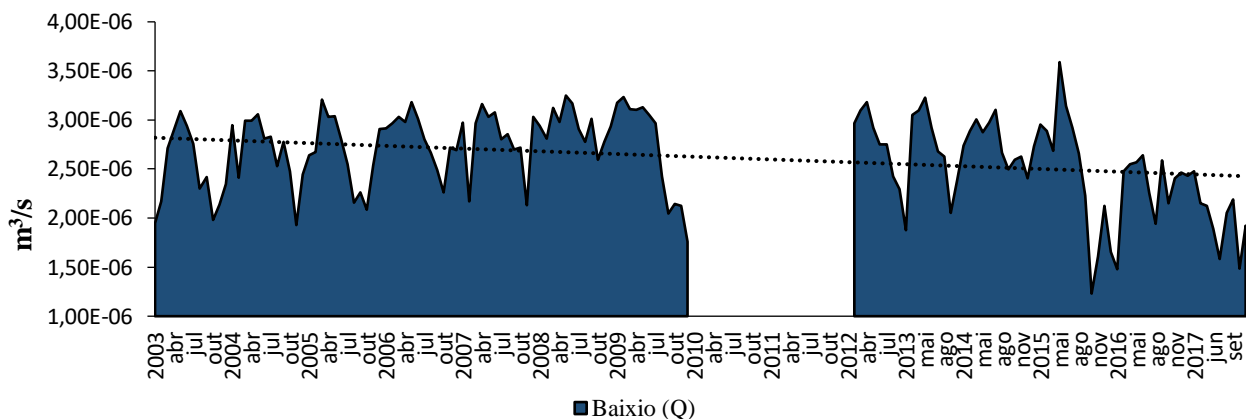


Figura 15: Fluxo de base para o período de 2003 a 2017.

Entre os anos observados o biênio 2015-2016 demonstrou que o fluxo de base reduziu gradativamente no período seco, e nos períodos chuvosos ocorreu aumento do nível de contribuição subterrânea para o igarapé, acompanhando o ciclo sazonal das chuvas, caracterizou os movimentos descendentes e ascendentes das oscilações do lençol freático em períodos sazonais considerado normal, incluindo, também, os picos extremos por influência direta do nível do igarapé.

CONCLUSÃO

O comportamento do nível do lençol freático do platô ao baixio segue com movimentos oscilatórios assimétricos constantes, mas, algumas variações temporais, diante do regime pluviométrico sazonal, medidas em diferentes períodos, podem causar inferências na assimétrica das ondas dos níveis medidos entre os piezômetros.

No baixio o nível variou no período de 2003 a 2016 na frequência de 0.10m a 0.60m; na vertente de 3m a 5m e no platô de 23m a 42m de profundidade.

Os ensaios da condutividade hidráulica saturada do solo mostraram resultados heterogêneos para 1.5m a 5.90m de profundidade ao longo de uma seção transversal. Os pontos com maior condutividade favoreceram a circulação do fluxo e indicaram maior velocidade onde a conservação de energia em direções com condutividade hidráulicas altas, e, próximo do igarapé, com condutividades hidráulicas baixa, controlam o fluxo de base com vazões mínimas através da zona de descarga e mantem um fluxo perene do igarapé durante o ano todo. Não houve mudanças significativas da velocidade do fluxo sazonal e interanual, pois este depende, principalmente, das mudanças estruturais do solo.

Este trabalho demonstra, pela primeira vez na área local, que a variabilidade espacial da condutividade é impulsionada por diferenças estruturais do solo, camadas, declividade, relevos e provável estado físico de cada piezômetro que se encontra parcialmente inserido no aquífero livre. Portanto, é importante que isso seja abordado no futuro para estudos que envolvam a transmissividade, transporte de solutos e a recarga da água subterrânea de aquíferos livres considerando as sequências topográficas da região.

CONFLITOS DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, à Universidade do Estado do Amazonas – UEA pelas bolsas de estudo de Mestrado, ao LBA, aos doutores e coordenadores do Grupo de Hidrologia pela disponibilização dos dados, orientação, atenção e aos colegas de trabalho por toda ajuda e apoio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AB´Saber. (2002). Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. *SciELO*, 14 (45): 1-26.
- Aguiar, C. J. B. (2002). **Carta Hidrogeológica da cidade de Manaus**. Manaus: CPRM, 2002. 8 p.
- Ameli, A. A; McDonnell, J. J.; Bishop, K. (2016). The exponential decline in saturated hydraulic conductivity with depth: a novel method for exploring its effect on water flow paths and transit time distribution. *Hydrological processes*, DOI: 10.1002/hyp.10777.
- Andrade, E. M.; Aquino, D.N.; Luna, N. R. S.; Lopes, F. B.; Crisóstomo, L.A. (2016). Dinâmica do nível freático e da salinização das águas subterrâneas em áreas irrigadas. *Rev. Ceres, Viçosa*, v. 63, n.5, p. 621-630.
- Bernardi, J.V.E.; Lacerda, L.D.; Dórea, J.G.; Landim, P.M.B. (2009). Aplicação da Análise das componentes principais na ordenação dos parâmetros físico-químicos no alto rio madeira e afluentes, Amazônia ocidental. *Geochimica Brasiliensis*, 23(1) 079-090.
- Bravard, S. e Righi, D. 1989. Geochemical differences in Oxisol-Sopodsol toposequence of Amazônia, Brazil. *Catena*, 44: 29-42.
- Bravard, S. e Righi, D. 1990. Podzols in Amazonia. *Catena*. 17: 461- 475.
- Broedel, E.; Tomasella, J.; Cândido, L. A.; Ranow, L. A. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought. (2017). *Hydrology Processss*. Vol. 31, Iss: 9, p. 1749-1759.
- Brito, A. P. (2014). *Elaboração de modelo numérico de fluxo de água subterrânea para uma microbacia de água clara na reserva florestal Adolpho Duke, Manaus-AM*. Dissertação de mestrado, Instituto de Ciências Exatas Programa de Pós-graduação em Geociências/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas. 129pp.

- Caicedo, N. L. (2001) Água Subterrânea. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2^a.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH. (Coleção Brasileira de Recursos Hídricos; v4), Volume 4- Capítulo 8.
- Carneiro, V. M. C. (2004). Composição florística e análise estrutural da floresta primária de terra firme na bacia do rio cuieiras, Manaus-AM. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Estadual do Amazonas, Manaus, Amazonas. 77 pp.
- Carvalho, A. M.; Freitas, L. G.; Barbosa, A. M.; Filho, J. L. A.; Mondelli, G. (2013). Determining the hydraulic conductivity of a contaminated area in Sao Paulo using slug test method. *ABAS*, 27(3): 71-87.
- Carvalho, J. S. (2012) *Caracterização hidrogeológica da região a norte da cidade de Manaus, com base em informações geofísicas (resistividade elétrica), geológicas e geomorfológicas*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/ Universidade Estadual do Amazonas, Manaus, Amazonas. 180pp.
- Camargo, M.N. & Falesi, I.C. (1975). Soils of the Central Plateau and Transamazonica Highway of Brazil. Soil Management in Tropical America (eds E. Bornemiza & A. Alvarado), pp. 123-156. North Carolina State University, Raleigh.
- CPRM. (2016). Programa integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil: *Geologia e Recursos Minerais da Região Metropolitana de Manaus*. Recursos Minerais. Cartografia da Amazônia e Levantamento Geológico Básicos. In Silvio Roberto Lopes Riker Felipe José da Cruz Lima. Marcelo Batista Motta e Desaix Paulo Balieiro Silva. Manaus. Esc. 1:1.500.000. Texto Explicativo, 402 p. [CDROM].
- Cuartas, L. A.; Tomasella, J.; Nobre, A. D.; Hodett, M. G.; Waterloo, M. J.; Múnera, J. C. (2007). Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. *Elsevier Science*, 145: 69–83.

- Cunha, P.R.C.; Melo, J.H.G. e Silva, O.B. (2007). *Bacia do Amazonas*. Boletim de Geociências da Petrobrás, 15(2.): 227-251.
- Cunha, P. R. C.; GONZAGA., F.G.; COUTINHO, L.F.C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro: Petrobras, 1994. v.8, n.1, p. 47-55, jan./mar.
- Chauvel, A. 1982. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. *Acta Amazonica*, 12(3): 47-60.
- Chauvel, A. 1981. Contribuição para o estudo da evolução dos latossolos amarelos distróficos na borda do platô, na região de Manaus: mecanismo da gibsitização. *Acta Amazonica*, 11 (2): 277-245.
- Debortoli, N; Dubrueil, V.; Delahaye, F.; Filho, S. R. (2012). Análise temporal do período chuvoso na Amazônia meridional brasileira (1971-2010). *Geonorte*, 1(5): 382-394.
- Dias, A.C.C.P.; Neves, A.D.S. & Barbosa, R.C.M. (1980). Levantamento de solos da estação experimental Rio Negro. Boletim Técnico da CEPLAC 71, 1-13.
- DAWSON, K. J., JONATHAN, I. D. (1991). *Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*. Chelsea: Lewis.
- Farjado, J. D. V.; Ferreira, S. J. F.; Miranda, S. Á, F.; Filho, A. O. M. (2010). Características hidrológicas do solo saturado na reserva florestal Adolpho Ducke - Amazônia central. *Árvore*, 34(4): 677-684.
- Ferraz, F. M.; Miyashiro, N. J.; Riyis, M. T.; Cunha, R. C. A. (2015). Study of hydraulic conductivity obtained in field tests: infiltration in percussion drills and slug test in monitoring wells. *InterfacEHS*, 10(1): 66-87.
- Ferreira, S. J. F. (2002). Propriedades físicas do solo após extração seletiva de madeira na Amazônia central. *Acta Amazônica*, v.32, n.3, p.449-466.

- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (2017). *Água subterrânea, a Terra e o Homem*. Edição Instituto Água Sustentável. *Água Subterrânea*, Vol.2, p. 1-12.
- Fontes Júnior V.P, Montenegro A.A.A, Montenegro S.M.G.L & Santos T.E.M. (2012). Estabilidade temporal da potenciometria e da salinidade em vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16:1188-1197.
- Gama, J. R. V.; Souza, A. L.; Martins, S.V.; Souza, D. C. (2005). Comparação entre florestas de várzea e de terra firme do estado do Pará. *SIF*, 29, (4): 607-616.
- Gasnier, T. R. (2007). *A postilas de biomas e ecossistemas da Amazônia*. Instituto de Ciências Biológicas/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas. 50pp.
- Guillaumet, J.L. 1987. Some structural and floristic aspect of the forest. *Experientia*. 43(3): 241- 251.
- Higuchi, N.; Santos, J. dos; Vieira, G.; Ribeiro, R.J.; Sakurai, S.; Ishizuka, M.; Sakai, T.; Tanaka, N.; Saito, S. Análise estrutural da floresta primária da bacia do rio Cuieiras, ZF 2, Manaus-AM, Brasil. *In: Higuchi, N.; Campos, M.A.A.; Sampaio, P.T.B.; Santos, J. dos (Eds). (1998). Pesquisas florestais para a conservação da floresta e reabilitação de áreas degradadas da Amazônia*. INPA, Manaus-AM. 50-81.
- Hvorslev, H. J. (1951). *Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations*. U.S. Army. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin n. 36, 50 pp.
- Khan, F. 1987. The distribution of palm function of local to topography in Amazon terra firme forest. *Experientia*. Basel. 43: 251 –258.
- JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. Soil physics. New York: John Wiley and Sons, 1991. REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Manole, 2004.

- Kalbus, E.; Reinstorf, F.; Schirmes, M. (2006). Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 873–887.
- IBGE. (2011). Amazônia concentra 45% da água subterrânea potável. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Site: <https://www.globo.com>. Acesso: 20/6/2019
- Lima, F. D. de A.; Matos, F.D. A.; Amaral, I.L.; Revilla, J.; Coêlho, L. de S.; Ramos, J.F.; Santos, J.L. (2001). Inventário florístico de floresta ombrófila densa de terra firme, na região do rio Urucu-AM, Brasil. *Acta Amazonica*, 31(4): 565-579.
- Lucas, Y; Chauvel, A.; Boulet, R.; Ranzani, G.; Scatolini, F. 1984. Transição Latossolos – Podzóis Sobre a Formação Barreira na Região de Manaus. *Revista Brasileira da Ciência do Solo*, Campinas. 8: 325 –335.
- Luizão, F.J. 1995. *Ecological Studies in Contrating Forest Types in Central Amazônia*. PhD. Thesis. University of Stirling, Scotland. UK. 250 p.
- Marques, J. D. O., Luizão, F. J., Teixeira, W. G., Sarrazin, M., Ferreira, S. J., Beldini, T. P., & De Araújo Marques, E. M. (2015). Distribution of organiccarbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 232–242.
- Machado, A. L. S. & Pacheco, J. B. (2010). Serviços ecossistêmicos e o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica amazônica - the biotic pump. *GEONORTE*, 01 (01): 71-89.
- McDonald, R. I; Webera, K.; Padowskib, J.; Florkec, M.; Schneiderc, C.; Greend, P. A.; Gleesone, T.; Eckmanf, S.; Lehnerg, E.; Balkh, D.; Bouchera, T.; Grillg, G.; Montgomery, M. (2014). Water on an urban planet: *Urbanization and the reach of urban water infrastructure*. *Global everinmonental Change*. Contents lists available at Science Direct, 96-105.

- Marengo, J. A, Tomasella J, Alves LM, Soares WR, Rodriguez DA. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys Res Lett* 38: L12703.
- Marques, J. D. O. (2015). *Influência de Atributos Físicos e Hídricos do Solo na Dinâmica do Carbono Orgânico sob Diferentes Coberturas Vegetais na Amazônia Central*. Tese de doutorado. Instituto nacional de Pesquisas da Amazônia. Programa Integrado de Biologia Tropical e Recursos Naturais-PIPG.
- Miranda, J. S. N. (2017). *Caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero alter do chão na cidade de Manaus – AM*. Dissertação de Mestrado em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, 130pp.
- Oliva, A.; Kiang, C. H.; Caetano-Chang, M. R. (2005). Determination of the hydraulic conductivity of the Rio Claro formation: comparative analysis through grain size analyses and Guelph permeameter and slug tests. *Águas Subterrâneas*, 19(2): 1-17.
- Oliveira, L. A. & Campos, J. E. G. (2004). Parâmetros Hidrogeológicos do Sistema aquífero Bauru na Região de Araguari/mg: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. *Geociências*, 34(2): 213-218.
- ONI. Golden gate weather services: *El Niño and La Niña Years and Intensities Based on Oceanic Niño Index*. Disponível em: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em maio de 2019.
- Pauletto, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A. & MORAES, S.O. (1988). Determinação da condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:189-195.
- Rebouças, A. C.; Braga, B. & Tundisi, J. G. (2006). *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. Editora Escrituras, São Paulo, 3ª. Edição, 748p.
- Ranzani, G. (1980). Solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica* 10, 7-31.

- Reichardt, K. (1990). A água em sistemas agrícolas: *Aspectos agrometeorológicos, edafológicos e de manejos agrícolas incluindo aspectos da água na atmosfera e no solo, os componentes do balanço hídrico das culturas e formas práticas de medida para irrigação e/ou manejo da água*. São Paulo: Manole. 188p.
- Richter, D.D. & Babbar, L.I. (1991). Soil diversity in the tropics. *Advances in Ecological Research* 21, 315-381.
- Sanchez, P.A. (1976). *Properties and Management of Soils in the Tropics*. Willey and Sons, New York.
- Santos, T. B.; Mancini, F.; Rostirolla, S. P.; Barros, C. E. M. & Salamuni, E. (2011). Registro da deformação pós-paleozóica na Bacia do Amazonas, região de Itaituba (PA). *Geociências*, 41(1): 95-107.
- Silva, P. A. D & Loureiro, C. O. (2006). *Pequenas variações piezométricas nas águas subterrâneas. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, p.1-14.
- Silva, A. J.P.; Lopes, R. C.; Vasconcelos, A.M. E Bahia, R. B. C. (2003). *Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores*. In: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M. e Gonçalves, J. H. 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Brasília, Cap. II, p.55-85.
- Silva, M. S. R.; Miranda, S. A. F.; Domingos, R. N.; Silva, S. L. R.; Santana, G. P. (2013). Classificação dos rios da Amazônia: Uma Estratégia para Preservação Desses Recursos. *Holos Environment*, v.13 n.2, P.163 ISSN: 1519-8634 (On-Line).
- Simmons, C. T. (2008). Henry Darcy (1803-1858): Immortalized by his scientific legacy. *Hydrogeology Journal*, v. 16, p. 1023–1038.
- Sioli, H. (1984). Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. *Amazoniana*. v.1, p.74-83.

Soares, Emílio Alberto Amaral; Wahnfried, Ingo; Dino, Rodolfo. (2016). *Subsurface stratigraphy of the cretaceous-neogene sedimentary sequence of Manaus and Itacoatiara regions, Central Amazon*. Geologia Usp. Série Científica, [s.l.], v. 16, n. 1, p.23-41, 7 abr. Universidade de São Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP.

Souza, L. S. B.; VERMA, O. P. (2006). Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus/AM (zonas norte e leste) através de perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. *Geociências*, v. 19, n. 1, p. 111-127.

Souza, E. L.; Galvão. P. H. F.; Pinheiro, C. S. S.; Baessa, M. P. M.; Demétrio, J. G. A.; Brito, W. R. R. (2012). Synthesis of the hydrogeological studies in the sedimentary basins Amazon and Solimões: The Aquifers Systems Içá-Solimões and Alter do Chão. *Geologia-USP*, 13 (1): 110-110.

Souza, L. S. B. *Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus (AM) – Utilizando perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical*. Dissertação, Universidade do Estado do Pará- UFPA, 2005.

Scherpinski, C; Miguel, U. A; Boas, A. V. M.; S. César, S.; J. Johann, A. (2010). *Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo*. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 32, n. 1, p. 7-13.

Sutanudjaja, E.; R, V. Beek; Niko Wanders; Yoshihide Wada; Joyce H. C.; Bosmans, Niels Drost.; Ruud J. van der Ent.; Inge E. M. de Graaf.; Jannis M. Hoch.; Kor de Jong.;Derek Karssenber.; Patricia, López López; Stefanie Peßenteiner; Oliver Schmitz;Menno W. Straatsma; Ekkamol Vannamete; Dominik Wissner; and Marc F. P. Bierkens1. (2018). *PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources mode*. Geosci. Model Dev., 11, 2429–2453.

Tomasella, J.; Hodnett, M.G.; Cuartas, L.A.; Nobre, A.D. Waterloo, M.J. e Oliveira, S.M. (2007). The water balance of in Amazonian micro-catchment: the effect of

interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hidrological Processes*, 22, p. 2133-2147.

Tomasella, J.; Borma, L. S.; Marengo, J. A.; Rodriguez, D. A.; Cuartas, L. A.; Carlos, A. Prado, M. C. R. (2008). The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem, *Hidrological Processes*, 22, p.2133–2147.

Wakode, H. B.; Baier. K.; Jha. R.; Azzam. R. (2018). *Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India*. International Soil and Water Conservation Research 6, 51–62. Contents lists available at Science Direct.

Whitmore, T.C. e G.T. Prance 1987. Biogeography and Quaternary history in tropical America. Clarendon Press, Oxford.