



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO

RELAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
COBERTURA DO SOLO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL AUTOMATIZADO NA
BACIA DO RIO IPANEMA

ALEXANDRO MEDEIROS SILVA

João Pessoa – PB
2017

Alexandro Medeiros Silva

**RELAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
COBERTURA DO SOLO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL AUTOMATIZADO NA
BACIA DO RIO IPANEMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) - UFPB, área de concentração em Gestão do Território e Planejamento Ambiental, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos.

**João Pessoa – PB
2017**

S586r Silva, Alexandro Medeiros.

Relação da variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo e da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL automatizado na bacia do rio Ipanema / Alexandro Medeiros Silva.- João Pessoa, 2017.

73 f. : il.-

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CCEN

1. Geografia. 2. SEBAL. 3. Caatinga. 4. Semiárido.
5. Automatização. 6. Evapotranspiração. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 913(043)

“Relação da variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo e da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL automatizado na bacia do rio Ipanema”

por

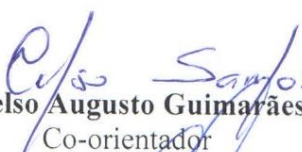
Alexandro Medeiros Silva

Dissertação apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente.

Aprovada por:


Prof. Dr. **Richarde Marques da Silva**
Orientador


Prof. Dr. **Celso Augusto Guimarães Santos**
Co-orientador


Prof. Dr. **Eduardo Rodrigues Viana de Lima**
Examinador interno

Prof. Dr. **Bernardo Barbosa da Silva**
Examinador externo

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Curso de Mestrado em Geografia

Fevereiro/2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial aos meus pais, Maria Salete Medeiros Silva e Sérgio Antônio da Silva, e ao meu irmão, Leandro Medeiros que sempre me ajudaram e apoiaram ao longo da minha jornada desde a graduação, prestando sempre todo o suporte que estava ao seu alcance e que sem dúvidas não teria conseguido concluir mais essa etapa da minha vida sem a ajuda deles.

Agradeço também ao Professor Dr. Richarde Marques da Silva, coordenador do Laboratório de Ensino, Projetos e Pesquisas em Análises Espaciais (LEPPAN), que me orienta desde 2012 quando ingressei no laboratório. Agradeço não só pelas orientações e discussões teóricas e técnicas que tivemos ao longo desses anos e que foram fundamentais para que conseguisse concluir mais essa etapa, mas agradeço também por toda força, suporte e pela amizade que transcende os limites da universidade.

Agradeço também ao Professor Dr. Celso Augusto Guimarães Santos que foi peça fundamental para o desenvolvimento do presente trabalho, aceitando o desafio de automatizar o SEBAL, e me dando todo o apoio necessário para que pudéssemos alcançar um bom resultado. Além disso, agradeço por todas as conversas, discussões e explicações que sempre foram importantíssimas.

Não poderia deixar de agradecer a todos os integrantes do LEPPAN, principalmente a Isabella Medeiros, Ana Paula Xavier, Glauciene Justino, Jorge Flavio Cazé, e José Carlos Dantas por estarem sempre à disposição para ajudar no que for necessário.

Agradeço a Victor Hugo Coelho por toda ajuda que me deu ao longo do desenvolvimento da pesquisa, nas discussões sobre o trabalho e por disponibilizar alguns dados para a execução do trabalho.

Por fim, agradeço a todo corpo docente do PPGG e a todos os integrantes da Turma 2015.

“A fé na **VITÓRIA** tem que ser **INABALÁVEL**”

(Anjos – O Rappa)

Resumo

A degradação ambiental é um dos resultados da pressão excessiva das ações antrópicas através de diferentes formas de uso da terra, bem como, da influência dos fatores climáticos, que é ainda mais atuante na Caatinga. A Caatinga é um bioma muito susceptível a modificações do clima e do uso e ocupação do solo. Com isso, estudar as alterações na paisagem ocorridas nesse bioma torna-se necessário para compreender os impactos dessas modificações no comportamento da evapotranspiração nos diferentes usos do solo. Desta forma, este trabalho, fazendo uso do sensoriamento remoto, pretende analisar a influência dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo nas estimativas da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL automatizado, para uma porção do bioma Caatinga, a bacia hidrográfica do rio Ipanema (BHRI), localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas. Para analisar as modificações no uso e cobertura do solo foram utilizadas quatro imagens Landsat. No mapeamento foram identificadas quatro classes de uso do solo, a saber: vegetação arbórea/arbustiva; vegetação herbácea; agricultura/pecuária; solo exposto. Como resultado do mapeamento dos usos e cobertura do solo, verificou-se que para o período analisado, áreas de solo exposto foram as que apresentaram uma maior variação, com 115% entre 2005 e 2015. Para as estimativas da evapotranspiração foram utilizadas 282 imagens do sensor MODIS, entre os anos de 2005 e 2015. Devido a aplicação do SEBAL necessitar de um longo processamento, automatizar a aplicação desse algoritmo pode ser uma alternativa para otimizar a estimativa da evapotranspiração para uma grande série de imagens. Nesse sentido, a aplicação do algoritmo SEBAL para o presente trabalho foi totalmente automatizada, utilizando-se uma rotina computacional desenvolvida no *software* MATLAB[®]. Além das estimativas da evapotranspiração, foram analisados o NDVI, a temperatura de superfície e o saldo de radiação, para o mesmo período. Para o NDVI, observou-se que nos meses de junho a agosto foram estimados os maiores valores, com média de aproximadamente 0,6 para toda a BHRI. Para a temperatura de superfície, foram estimados valores entre 21 e 50°C. O mês que apresentou as maiores temperaturas foi o mês de novembro, onde grande parte da bacia apresentou temperaturas superiores a 40°C. As estimativas do saldo de radiação diário médio mostraram valores entre 85 e 203 W/m². As maiores médias do saldo de radiação foram identificadas nos meses de novembro a dezembro. Para a evapotranspiração mensal, observou-se que a partir do mês de março, quando o volume pluviométrico na BHRI começa a aumentar, os valores médios de ET mensal começam a diminuir em uma proporção relativamente similar entre os diferentes tipos de uso do solo. Entretanto, o aumento dos valores de ET mensal nas áreas de vegetação arbórea/arbustiva e vegetação herbácea acontecem de forma mais rápida, ao passo que nas áreas de agricultura/pastagem e solo exposto esse aumento ocorre de forma mais gradual. Os resultados mostraram uma diminuição de 31% da evapotranspiração anual média para a BHRI, entre os anos 2005 (1211,42 mm/ano) e 2015 (831,22 mm/ano). De acordo com os resultados obtidos, as estimativas obtidas a partir do algoritmo de automatização do SEBAL foram bem próximas quando comparadas com as obtidas por um especialista. Por fim, os resultados obtidos no presente trabalho foram satisfatórios e passam a fornecer importantes informações sobre as características biofísicas da BHRI, que até então eram escassas.

Palavras chaves: SEBAL, Caatinga, Semiárido, Automatização, Evapotranspiração.

Abstract

Environmental degradation is one of the results of the excessive pressure of anthropic actions through different forms of land use, as well as the influence of climatic factors, which is even more active in the Caatinga. The Caatinga is a Brazilian biome very susceptible to modifications of the climate and land uses. Then, to study the changes in the landscape occurred in this biome, it becomes necessary to understand the impacts of these modifications on the behavior of evapotranspiration in the different land uses. Thus, this work, using remote sensing, intends to analyze the influence of different types of land use on evapotranspiration estimates using the automated SEBAL algorithm for a portion of the Caatinga biome, the Ipanema River basin (BHRI), which is located between the states of Pernambuco and Alagoas. In order to analyze the changes in land cover, four Landsat images were used. In the mapping of land use four classes were identified, i.e. dense canopy, grassland, agriculture/pasture, and bare land. As result of the land use and land cover mapping, it was verified that for the analyzed period, areas of bare land were those that presented a greater variation, with 115% between 2005 and 2015. For the estimates of evapotranspiration, 282 images of the MODIS sensor were used between 2005 and 2015. Since the application of SEBAL requires a long process, automating the application of this algorithm may be an alternative to optimize the estimation of evapotranspiration for a long series of images. In this sense, the application of the SEBAL algorithm for the present work was totally automated, using a computational routine developed in MATLAB® software. Besides the estimates of evapotranspiration, the NDVI, surface temperature and net radiation were analyzed for the same period. For the NDVI, it was observed that from June to August the highest values were estimated, which average is around 0.6 for the whole BHRI. For the surface temperature, the values were estimated between 21 and 50°C, the month that presented the highest temperatures was November, when much of the basin had temperatures above 40°C. Estimates of the average daily net radiation showed values between 85 and 203 W/m². The highest averages of the net radiation were identified from November to December. For the monthly evapotranspiration, it was observed that from March, when the rainfall volume over the BHRI starts to rise, the average values of monthly ET begin to decrease in a relatively similar proportion among the different types of soil use. However, increase of the monthly ET values in the areas of dense canopy and grassland happens faster, whereas in the areas of agriculture/pasture and bare land this increase occurs more gradually. The results showed a 31% decrease in the mean annual evapotranspiration for the BHRI between 2005 (1211.42 mm/year) and 2015 (831.22 mm/year). According to the obtained results, the estimates obtained from the algorithm of SEBAL automation were very close when compared to those obtained by a specialist. Finally, the results obtained in the present work were satisfactory and provide important information about the biophysical characteristics of BHRI, which were until now very scarce.

Keywords: SEBAL, Caatinga, Semiarid region, Automatization, Evapotranspiration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Ipanema.....	15
Figura 2. Precipitação média mensal na bacia do rio Ipanema (1974–2015).....	16
Figura 3. Mapa dos tipos de solo da BHRI.....	17
Figura 4. Mapa das classes de relevo da BHRI.	18
Figura 5. Localização da cena compreendendo a BHRI.	26
Figura 6. Fluxograma das etapas para a obtenção do saldo de radiação a superfície e entre parênteses as equações utilizadas.	31
Figura 7. Exemplo das falhas encontradas na banda 5 dos produtos 09A1.....	32
Figura 8. Fluxograma das etapas para a estimativa da evapotranspiração e entre parênteses as equações utilizadas.	34
Figura 9. Fluxograma ilustrativo do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível (H).....	35
Figura 10. Fluxograma da rotina computacional para a aplicação do SEBAL-A.	38
Figura 11. Exemplo das máscaras e do primeiro grupo de pixels elegíveis a âncoras: (a) máscara do NDVI, (b) máscara do albedo, (c) máscara da temperatura de superfície e (d) 1º grupo de pixels elegíveis como âncoras.	40
Figura 12. Definição dos quartis e seleção do pixel âncora: (a) distribuição do 1º. grupo de pixels elegíveis como âncoras e seus respectivos quartis, (b) distribuição do 2º. grupo de pixels elegíveis como âncoras.....	41
Figura 13. Fluxograma ilustrativo das etapas para a escolha dos pixels âncoras do SEBAL-A.	42
Figura 14. Uso e ocupação do solo da bacia do rio Ipanema (BHRI) para os anos: (a) 2005, (b) 2008, (c) 2010 e (d) 2015.....	44
Figura 15. Espacialização das áreas inalteradas na BHRI para o período de 2005 a 2015.	47
Figura 16. Comparação entre os pixels frios selecionados pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).	50
Figura 17. Comparação entre os valores dos pixels quentes selecionados pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).....	52
Figura 18. NDVI médio mensal da BHRI para os anos de 2000 a 2015.....	56
Figura 19. Distribuição da pluviosidade mensal média e variação do NDVI na BHRI.	57

Figura 20. Espacialização da temperatura média mensal da superfície da BHRI para o período de 2005 a 2015.	58
Figura 21. Variação da temperatura média mensal da superfície e do ar da BHRI para o período de 2000 a 2015.	59
Figura 22. Espacialização do saldo de radiação diário médio da BHRI para o período de 2000 a 2015.	60
Figura 23. Espacialização da ET mensal média da BHRI para o período de 2000 a 2015.	62
Figura 24. Comportamento da ET mensal ao longo do ano para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo da BHRI no período de 2005 a 2015.	63
Figura 25. ET anual média e precipitação anual para a BHRI no período de 2005 a 2015.	64
Figura 26. Distribuição da evapotranspiração anual na BHRI para o período de 2005 a 2015.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de relevo, área e porcentagem na BHRI.	19
Tabela 2. Descrição das camadas do produto MODIS 09A1	25
Tabela 3. Descrição das camadas do produto MODIS 11A1	26
Tabela 4. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2005.....	27
Tabela 5. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2006.....	27
Tabela 6. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2007.....	27
Tabela 7. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2008.....	28
Tabela 8. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2009.....	28
Tabela 9. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2010.....	28
Tabela 10. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2011.....	29
Tabela 11. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2012.....	29
Tabela 12. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2013.....	29
Tabela 13. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2014.....	30
Tabela 14. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2015.....	30
Tabela 15. Coeficientes de ponderação para o cálculo do albedo de superfície	32
Tabela 16. Equações para a obtenção do saldo de radiação na superfície.....	33
Tabela 17. Equações para a estimativa da evapotranspiração	35
Tabela 18. Definição dos limites para criação das máscaras.....	40
Tabela 19. Área dos tipos de uso e ocupação da bacia do rio Ipanema.....	45
Tabela 20. Variação das classes de uso e ocupação do solo entre os anos de 2005 e 2015	46
Tabela 21. Distribuição das áreas não alteradas e que sofreram alteração na bacia para o período de 2005 a 2015.	48
Tabela 22. Comparação entre os valores dos pixels frios obtidos pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).	49
Tabela 23. Comparação dos valores dos pixels quentes pela seleção automática e por Coelho (2016).	51
Tabela 24. Correlação entre as estimativas da evapotranspiração obtidas pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).	53
Tabela 25. Estatísticas da ET anual para cada tipo de uso e cobertura do solo na BHRI	66

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Caracterização da área de estudo	15
1.2 Objetivos	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Categoria de análise geográfica.....	20
2.2 O semiárido brasileiro	20
2.3 Evapotranspiração	22
2.3 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Aquisição das imagens de satélites e dos dados observados para estimativa da evapotranspiração.....	24
3.2 Mapeamento do uso e ocupação do solo	30
3.3 Estimativa da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL	31
3.5 Automatização do algoritmo SEBAL (SEBAL-A)	36
3.6 Análise comparativa do desempenho do SEBAL-A	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do rio Ipanema.....	44
4.2 Validação do desempenho da rotina do SEBAL-A: comparação da seleção dos pixels âncoras e da estimativa da evapotranspiração	48
4.3 Estimativa dos parâmetros biofísicos para a bacia do rio Ipanema.....	55
4.4 Distribuição espacial da evapotranspiração estimada utilizando o SEBAL-A para a bacia do rio Ipanema.....	61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental é um dos resultados da pressão excessiva das ações antrópicas através de diferentes formas de uso da terra, bem como a influência dos fatores climáticos. Esse processo causa a redução da produtividade de biomassa e da biodiversidade, trazendo mudanças na qualidade e disponibilidade de água e na diminuição da viabilidade econômica (KAZMIERCZAK e SEABRA, 2007).

O bioma Caatinga vem sofrendo modificações em sua estrutura e composição ao longo dos anos, com alterações na paisagem natural a partir da intensificação da agricultura e da pecuária, e extração de lenha, que cada vez mais a torna vulnerável e fragmentada (SOUZA, 2009). O mesmo autor ainda destaca que a inserção do sistema agropastoril, por exemplo, tem se revelado insustentável, o que torna os processos de degradação física dos solos e a desertificação ainda mais severos, acarretando danos socioeconômicos e ecológicos.

Com isso, estudar as alterações na paisagem ocorridas no bioma Caatinga torna-se necessário para compreender os impactos de modificações no comportamento da evapotranspiração nos diferentes usos do solo desse bioma nos últimos anos. Nesse sentido, o conhecimento sobre a quantidade e o comportamento espaço-temporal da evapotranspiração pode prover importantes informações sobre as condições de um Geossistema ou indicar se estão ocorrendo mudanças significativas no mesmo (TEIXEIRA et al., 2013; RUHOFF, 2011; SCHERER-WARREN, 2011; ANDRADE et al., 2015; SILVA et al., 2015).

Para estudar as mudanças nos biomas, Tretin (2009) aponta que o sensoriamento remoto é uma técnica que fornece subsídios para o monitoramento da superfície terrestre, permitindo a determinação de padrões espaciais e temporais de diversas variáveis ambientais, e constituindo uma ferramenta importante para o planejamento ambiental. Além disso, o uso do sensoriamento remoto permite a realização de estudos em grandes áreas utilizando menos recursos financeiros, como por exemplo, estimativa de parâmetros biofísicos, saldo de radiação nas superfícies e evapotranspiração real.

Para Silva (2014), as aplicações de sensoriamento remoto em bacias hidrográficas possuem uma grande relevância no que tange ao conhecimento das informações sobre o uso e ocupação do solo. Além disso, o estudo de parâmetros biofísicos, como: índices de vegetação, albedo, temperatura de superfície, saldo de

radiação e evapotranspiração são de suma importância para a gestão ambiental, sobretudo quando estão integradas em Sistemas de Informações Geográficas.

Scherer-Warren et al. (2014) apontam que apesar da utilização do sensoriamento remoto ter sido impulsionada na última década, as aplicações de imagens termais têm sido utilizadas de forma incipiente no Brasil, principalmente em estudos de recursos hídricos, limitando-se ao uso de produtos com baixa resolução temporal e um alto percentual de cobertura de nuvens, como os satélites CBERS e o Landsat (BEZERRA et al., 2014; SILVA et al., 2014; GIONGO e VETTORAZZI, 2014; SILVA et al., 2016), mas ainda poucas aplicações usando sensores com imagens diárias têm sido observadas, como é o caso do MODIS (ALVEZ e AZEVEDO, 2015; OLIVEIRA et al., 2015).

Recentemente, houve um crescimento no interesse em quantificar a evapotranspiração em escala regional para diferentes tipos de uso e cobertura do solo, bem como, estimativas de produtividade de água em escala de bacia hidrográfica (SANTOS et al., 2017). Entretanto, estudos sobre as mudanças na paisagem no bioma Caatinga (BEUCHLE et al., 2015) e as suas implicações na evapotranspiração ainda são limitados. Além disso, métodos pontuais não conseguem representar as situações em escalas maiores. Dessa forma, as estimativas a partir de produtos do sensoriamento remoto podem ser utilizadas em diferentes escalas (MAHMOUD e ALAZBA, 2016; STEELE et al., 2015; TEIXEIRA, 2010).

Modelos que estimam a evapotranspiração a partir de imagens de satélite, como o SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (BASTIAANSEN, 1995), possuem várias etapas que devem ser executadas para se obter a estimativa da evapotranspiração. Esse tipo de modelo é complexo e exige experiência para que a sua aplicação seja realizada satisfatoriamente. Além disso, para aplicar esses modelos utilizando várias imagens é necessária uma quantidade grande de horas dedicadas às simulações. Com isso, visando uma contribuição aos estudos de estimativa de evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL, esse trabalho desenvolveu uma rotina computacional para a automatização desse algoritmo.

Desta forma, fazendo uso do sensoriamento remoto, analisou-se a influência dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo nas estimativas da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL automatizado, em uma porção do bioma Caatinga, mais precisamente na bacia do rio Ipanema, localizada nos estados de Pernambuco e Alagoas.

1.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Ipanema (BHRI) está localizada entre as coordenadas 08° 18' 04" e 09° 23' 24" de Latitude sul; 36° 36' 28" e 37° 27' 54" de Longitude oeste, possuindo uma área de 7.954,32 km² (Figura 1). A maior parte da bacia encontra-se no estado de Pernambuco, abrangendo 15 municípios: Pesqueira, Alagoinha, Venturosa, Pedra, Tupanatinga, Buíque, Águas Belas, Itaíba, Caetés, Ibirim, Manari, Paratama, Saloá, Iati, Arco Verde e Bom Conselho. A porção sul da bacia encontra-se no estado de Alagoas, abrangendo mais 6 municípios: Poço das Trincheiras, Santana do Ipanema, Olivença, Major Isidoro, Batalha e Belo Monte.

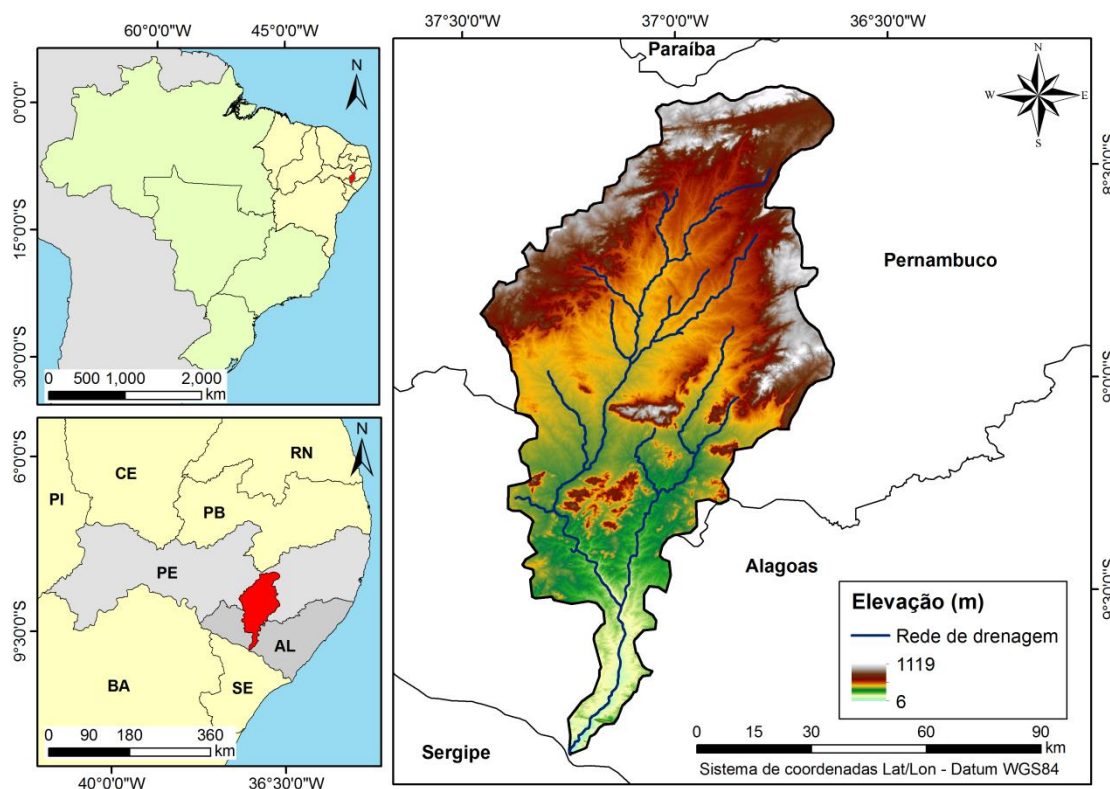


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Ipanema

A BHRI está inserida no bioma Caatinga e na região do semiárido nordestino, sendo uma das sub-bacias do rio São Francisco. Os principais afluentes do rio Ipanema são: Riacho Mororó, Riacho Mulungu, Riacho do Pinto, Riacho Mandacaru e rio Topera, pela margem direita; pela margem esquerda: rio dos Bois, riacho da Luiza, rio Cordeiro, rio Dois Riachos e o rio Cordeiro, o principal tributário do Ipanema.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo BSh (semiárido), caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. A BHRI apresenta precipitação média anual inferior a 700 mm e temperaturas médias anuais superiores aos 23°C. A média anual da evapotranspiração potencial também é elevada, com valores que podem ultrapassar 1.600 mm, apresentando assim um déficit hídrico na bacia durante a maior parte do ano (COELHO, 2016).

A Figura 2 apresenta a média mensal da precipitação para o período de 1974–2015. A partir dessa figura observa-se que historicamente os meses de março a junho são aqueles com os maiores volumes de chuva, superiores a 80 mm/mês. Entretanto, entre os meses de setembro a novembro são registradas as mais baixas precipitações, com valores inferiores a 20 mm.

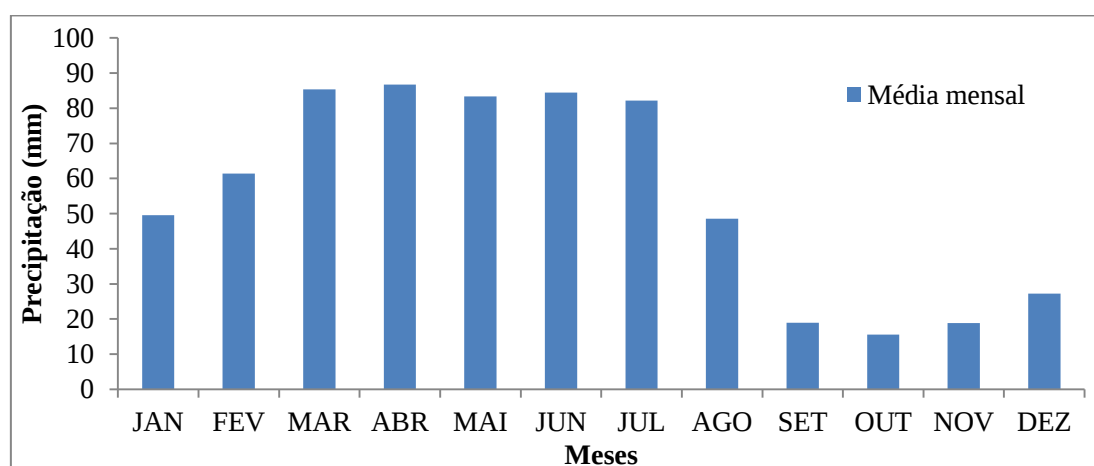


Figura 2. Precipitação média mensal na bacia do rio Ipanema (1974–2015).
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

A vegetação da região é a Caatinga do tipo hipoxerófila, caracterizada por possuir uma grande variação no regime foliar durante o ano. Na BHRI grande parte da vegetação natural foi suprimida pela ação antrópica, devido ao avanço da pecuária, agricultura familiar, extração de madeira e extração de minério (COELHO, 2016). Ainda segundo o mesmo autor, até mesmo nas regiões com vegetação mais densa, como no caso dos brejos de altitude, ocorreu intensa supressão vegetal, onde parte da vegetação original foi substituída por gramíneas.

A BHRI possui cinco tipos de solos, que estão espacializados na Figura 3. Verifica-se que o Planossolo Háplico é o mais representativo na bacia, compreendendo 69,48% da área da mesma. Os demais solos mais representativos são o Neossolo

Regolítico (porção leste e oeste da bacia) e o Neossolo Litólico (porção norte e sul da bacia), que ocupam 15,52% e 13,47% da área da bacia, respectivamente. Por fim, as áreas de Argissolo Vermelho-Amarelo e de Neossolo Quartzarênico representam 1,54% de toda a bacia.

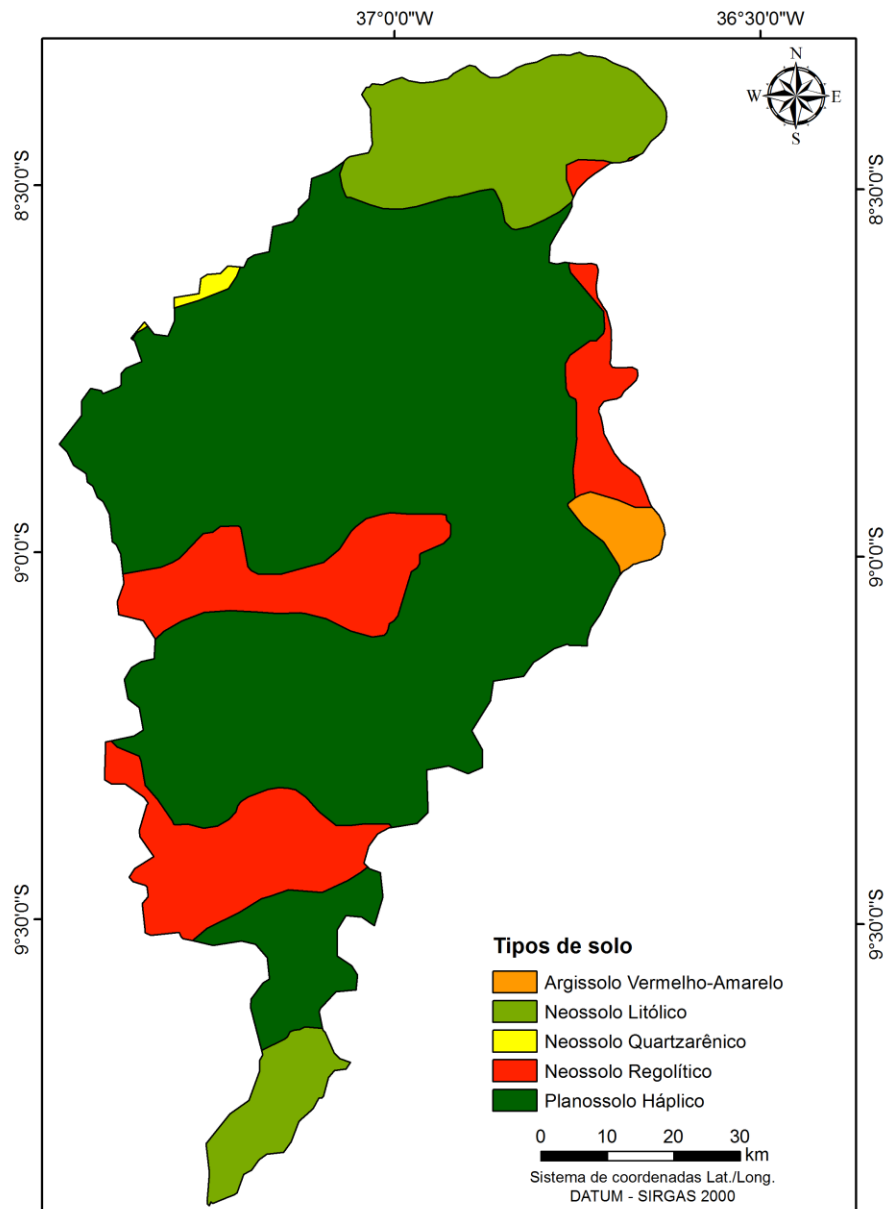


Figura 3. Mapa dos tipos de solo da BHRI
 Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

O relevo da BHRI é predominantemente suave ondulado, conforme as classes de declividade propostas por Pereira e Lombardi Neto (2004), que estão espacializadas na Figura 4.

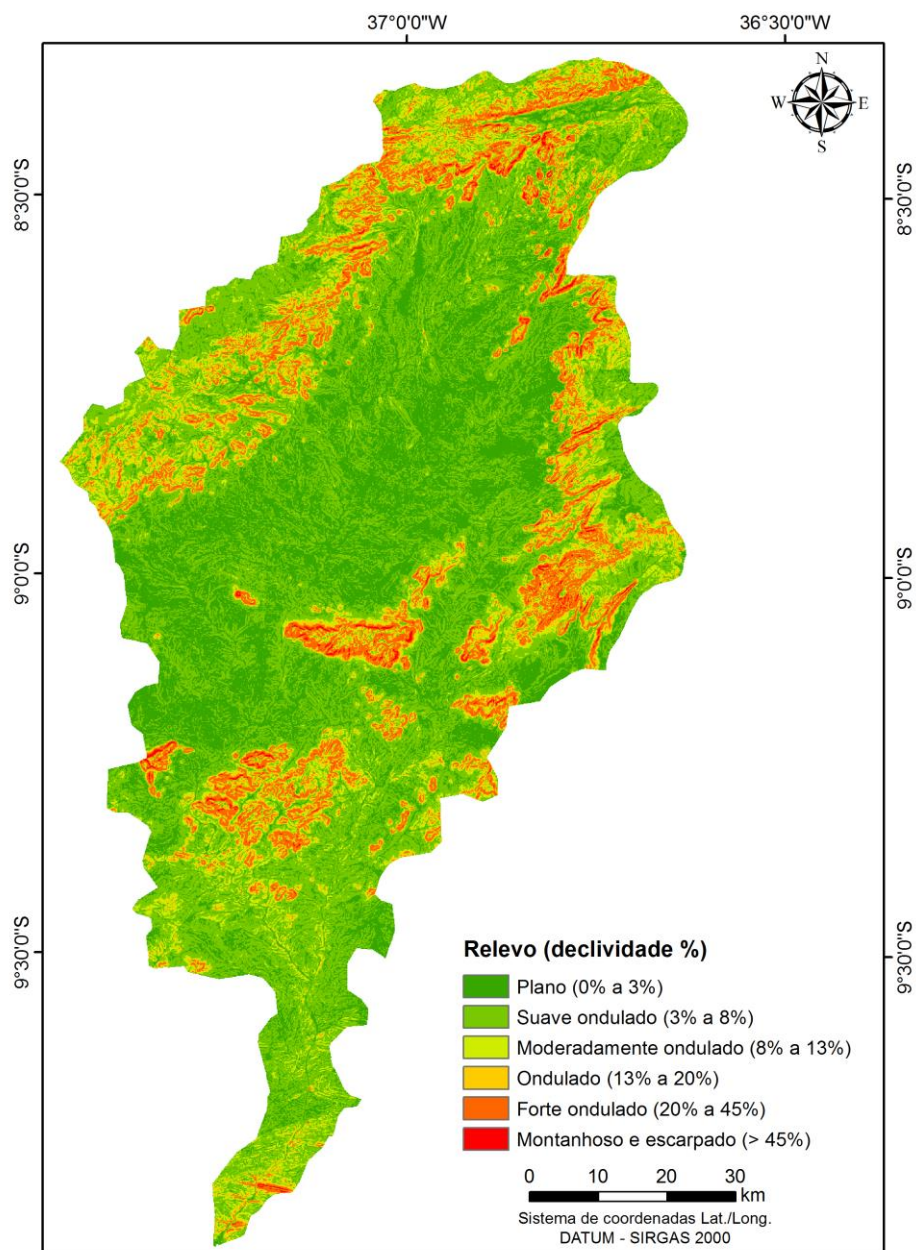


Figura 4. Mapa das classes de relevo da BHRI.

A Tabela 1 mostra as classes de relevo, área e porcentagem na BHRI. De acordo com essa tabela, a classe Suave Ondulado representa 42,41% da área da bacia e a classe de relevo Plano representa 29,78%. Essas duas classes são as mais representativas na porção central da bacia. Já o relevo ondulado (7,41%), forte ondulado (8,80%) e montanhoso (0,67%) estão localizados predominante nas áreas próximas aos limites da bacia, na porção noroeste e leste da bacia.

Tabela 1. Classes de relevo, área e porcentagem na BHRI.

Classes de Relevo	Área (km²)	%
Plano (0% a 3%)	2.368,41	29,78
Suave ondulado (3% a 8%)	3.373,05	42,41
Moderadamente ondulado (8% a 13%)	870,54	10,94
Ondulado (13% a 20%)	589,48	7,41
Forte ondulado (20% a 45%)	699,78	8,80
Montanhoso e escarpado (> 45%)	53,07	0,67
Total	7.954,32	100

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

- Analisar a influência da tipologia dos usos do solo na variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Ipanema.

Objetivos Específicos

- Detectar mudanças no uso e ocupação do solo na bacia do rio Ipanema entre 2005 e 2015;
- Implementar e avaliar o desempenho da automatização do algoritmo SEBAL para a bacia do rio Ipanema.
- Analisar o comportamento sazonal de parâmetros biofísicos (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, temperatura da superfície e saldo de radiação), na bacia do rio Ipanema;
- Estimar a variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração para os diferentes usos do solo da bacia do rio Ipanema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Categoria de análise geográfica

Todo estudo geográfico deve ser pautado sob a ótica de umas das categorias de análise da Geografia, sendo a categoria definida de acordo com o propósito e o objeto de cada pesquisa. Nesse sentido, a análise espacial necessita de um entendimento detalhado das categorias espaciais de análise, no que diz respeito a seus significados, bem como das possibilidades de uso de cada uma delas (LOPES, 2012).

Para Cabral (2007), a Geografia possui duas formas emblemáticas de análise espacial: de um lado situa-se a maior parte dos estudos, onde a análise consiste na descrição das formas físicas (morfologias) e/ou ambientais de uma determinada região; de outro as análises são pautadas no espaço como elemento ativo na organização social. Com isso, cada vez mais é necessário promover a interpretação dos fenômenos através de uma renovada análise espacial.

O conceito de paisagem para Geografia possui dois momentos distintos ao longo do tempo: em certo momento foi visto como o conceito capaz de fornecer a identidade à Geografia; em outro foi sendo deixado de lado, assumindo uma posição secundária, graças a ênfase dada as categorias como espaço, região, território e lugar (CABRAL, 2002).

A categoria paisagem, em linhas gerais, esteve e ainda está muito ligada a ideia das formas visíveis. Mas, a partir das décadas de 60 e 70 os estudos da paisagem voltam a ganhar força sob duas perspectivas: a cultural e a sistêmica. Para a perspectiva cultural, a paisagem está referenciada para o sentido de percepção espacial, sendo o entre meio do mundo das coisas e o da subjetividade humana. Já para a perspectiva sistêmica, a paisagem pode ser entendida como sendo o resultado de uma combinação dinâmica e instável, de elementos físicos, biológicos e humanos (LOPES, 2012).

Sob essa ótica Rosolém e Archela (2010) apontam que a pesquisa ambiental em Geografia tem por objetivo entender as relações entre a sociedade e a natureza, no qual deve ser analisada a partir do método sistêmico, por meio dos elementos que compõem a paisagem geográfica, resultando em uma unidade dinâmica e em suas interrelações dos elementos físicos, biológicos e antrópicos.

2.2 O semiárido brasileiro

A região semiárida do Brasil é a maior do mundo, possui uma área de 969.589,4° km², que corresponde a cerca de 18% do território nacional, abrangendo o

total de 1.133 municípios, sendo 53% da região Nordeste. A população do semiárido é de aproximadamente 22 milhões de habitantes, concentrando a maior parte da população rural do país (BRASIL, 2005).

Para Baptista e Campos (2014) as características da região semiárida devem-se, sobretudo ao modo de exploração da terra, aliado a escassez de chuva e ao limitado sistema de armazenamento de água. O semiárido brasileiro é o mais chuvoso do mundo, com pluviosidade média de 750 mm/ano, porém mais de 90% do volume de chuva não são aproveitados, principalmente pela dificuldade na formação de mananciais, causado pelo subsolo formado em 70% por rochas cristalinas (MALVEZZI, 2007).

O bioma Caatinga ocupa grande parte do semiárido brasileiro abrangendo uma área de 844 mil km², o que representa 87% da região semiárida brasileira. (MMA, 2013). A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro e possui uma grande variedade de paisagens, riquezas biológicas e endemismo, mas sofre com uma continua devastação (BAPTISTA e CAMPOS, 2014).

Apesar das condições climáticas desfavoráveis para a maioria das plantas, a Caatinga apresenta vegetação bastante diversificada, em geral, caducifólia, xerófila e, por vezes, espinhosas que variam com as características edáficas e hídricas de cada região (NASCIMENTO, 2015). Além disso, Francisco (2013) destaca que um dos fenômenos mais característicos da Caatinga é a perda da folhagem da maioria das espécies no período de estiagem e a sua rápida recuperação no período das chuvas.

O processo de desornamento da ocupação territorial, que remonta a época colonial causou efeitos na degradação dos recursos naturais do semiárido, como por exemplo: assoreamento dos rios, menor disponibilidade hídrica, redução da produtividade agrícola, diminuição da renda líquida dos agricultores, empobrecimento do meio rural, etc. Além disso, práticas como a extração ilegal de madeira, queimadas, uso intensivo de pastejo e a extração ilegal de minerais, corroboram para intensificar o processo de degradação dessa região, assim como apontado por Francisco (2013).

De acordo com Silans e Silva (2007), apesar da importância do bioma Caatinga, que abrange grande parte dos estados da região Nordeste, poucos estudos experimentais têm sido desenvolvidos no sentido de se compreender os fenômenos associados às transferências de calor e massa nessa região, e, conseqüentemente, de temperatura da superfície, saldo de radiação e evapotranspiração e outros fatores, como a biomassa vegetal.

2.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo de perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas. A evapotranspiração é responsável por transferir grandes volumes de água da superfície terrestre para a atmosfera. Além disso, a evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, e o seu valor integrado no tempo é de suma importância para estudos hidrológicos, agrônômicos e de modelagem atmosférica (BORGES, 2013).

A evapotranspiração pode ser classificada em dois tipos: potencial/referência e a real. A evapotranspiração potencial (ETP) é a quantidade de água transferida para a atmosfera de uma extensa superfície completamente coberta por vegetação de porte baixo (normalmente grama) e bem suprida de água. Já a evapotranspiração real (ETR) é a quantidade de água transferida para a atmosfera sob as condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo, sendo a ETR sempre menor ou igual à ETP (TUCCI e BELTRAME, 2014).

Para realizar medidas ou estimativas da evapotranspiração, são empregados alguns métodos tradicionais: medidas diretas; métodos baseados na temperatura; métodos baseados na radiação; métodos combinados; e balanço hídrico. Contudo, essas técnicas tradicionais empregam medições pontuais e não podem ser estendidas para grandes áreas, devido a heterogeneidade das superfícies e da natureza dinâmica dos processos de transferência de calor (ARAÚJO, 2014).

Com isso, o uso do sensoriamento remoto faz-se cada vez mais necessário para fornecer estimativas de parâmetros físicos relevantes em escalas maiores e que não podem ser representados por medições pontuais. Algoritmos que utilizam produtos do sensoriamento remoto para realizar estimativas de balanço de energia e da evapotranspiração tornaram-se cada vez mais populares, como, por exemplo, o *Two Source Energy Balance* (TSEB), sugerido por Norman et al. (1995); o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER), proposto por Teixeira (2012); o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), desenvolvido por Allen et al. (2007); e o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), proposto por Bastiaanssen (1995).

2.3 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

O SEBAL é um algoritmo formulado para a obtenção dos componentes do balanço de energia na superfície (BASTIAANSSEN 1998). Ele é empregado principalmente para a estimativa da evapotranspiração, a partir da densidade do fluxo de calor latente (LE), como resíduo da equação do balanço de energia.

Para isso, o algoritmo faz uso apenas de imagens de satélite e um pequeno conjunto de informações meteorológicas de superfície, que incluem velocidade do vento e temperatura do ar, para resolver o balanço de energia. Dentre seus principais produtos estão: Albedo de Superfície, Índices de Vegetação, Temperatura de Superfície, Saldo de Radiação, Fluxo de Calor no Solo, Fluxo de Calor Latente e a Evapotranspiração pixel a pixel (UDA, 2012; BORGES, 2013).

As principais vantagens da utilização do SEBAL apontadas por Bastiaanssen (1998) são: O cálculo empírico da variabilidade espaço-temporal da maioria dos parâmetros hidrometeorológicos, a desnecessidade de informações da cobertura da terra e a utilização de imagens de satélites com diferentes resoluções espaciais.

A principal característica do algoritmo SEBAL está na estimativa da densidade do fluxo de calor sensível (H). Ele é obtido a partir de um processo iterativo, onde se considera, inicialmente, a atmosfera em equilíbrio neutro e, posteriormente é identificada a condição de estabilidade e realizada as correções necessárias (ARAÚJO, 2014). O H é estimado com base na velocidade do vento, velocidade de fricção e temperatura de superfície, usando-se uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos a superfície (BASTIAANSSEN 1998).

Para Coelho (2016), trata-se então do método mais utilizado atualmente por possuir dependência mínima de dados de superfície e por apresentar resultados semelhantes aos métodos diretos e formulações consagradas na literatura. No entanto, para a sua melhor aplicação torna-se necessária a utilização de imagens de satélite em condições de céu sem nuvens e a presença de áreas secas e úmidas na imagem utilizada, assim como destacado por Oliveira (2012).

Desta forma, o SEBAL vem sendo aplicado e validado em diversas partes do mundo, como nos Estados Unidos, China, Egito, Espanha, Argentina, Índia, Brasil, entre outros, conforme apresentado nos estudos de Bastiaanssen (2000), Tasumi (2003), Bastiaanssen e Chandrapala (2003), Du Jia et al. (2013) e Oliveira et al. (2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram necessários obtenção de imagens orbitais, utilização de técnicas de sensoriamento remoto, e implementação e aplicação do algoritmo SEBAL automatizado, chamado aqui de SEBAL-A.

3.1 Aquisição das imagens de satélites e dos dados observados para estimativa da evapotranspiração

A etapa inicial foi a aquisição de imagens orbitais para serem utilizadas na estimativa da evapotranspiração. Para a execução deste estudo foram utilizadas imagens do sensor MODIS nos satélites Terra e Aqua, para as estimativas da evapotranspiração. Esses produtos são obtidos gratuitamente através do site <http://reverb.echo.nasa.gov>.

A escolha das imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) para as estimativas da evapotranspiração deve-se a alta resolução temporal das mesmas e por essas imagens possuírem produtos que minimizam os problemas oriundos pela cobertura das nuvens (09A1 e 11A2). O período de revisita dos satélites Aqua e Terra é de um a dois dias, ou seja, os sensores MODIS registram imagens de um mesmo ponto geográfico todos os dias, assim é possível obter duas imagens diárias de um mesmo local.

Dessa forma, foram utilizados os produtos de reflectância MOD09A1 e MYD09A1 e os produtos MOD11A2 e MYD11A2 de temperatura e emissividade da superfície oriundos dos satélites Terra (MOD) e Aqua (MYD). Ambos os produtos são uma composição *pixel a pixel* da melhor observação em um período de oito dias, o que permite a aquisição de um maior número de imagens onde a cobertura de nuvens não atrapalhe as estimativas realizadas. Assim é possível adquirir quatro imagens por mês da área de interesse de cada um dos satélites Terra e Aqua.

O produto MODIS 09A1 é composto por 13 camadas, a saber: (a) sete camadas de reflectância; (b) duas bandas de qualidade da reflectância; (c) ângulo zenital solar; (d) ângulo zenital do sensor; (e) ângulo relativo do azimuth e (f) dia do ano (disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09a1). Dessas 13 camadas, neste estudo foram utilizadas oito camadas (Tabela 2), sendo sete bandas espectrais de reflectância, com resolução espacial de 500 m, e uma camada do ângulo zenital solar com resolução de 1 km.

Os produtos MOD11A2/MYD11A2 são compostos por 12 camadas, são elas: (a) duas camadas de temperatura se superfície, uma diurna e uma noturna; (b) duas camadas de qualidade da imagem; (c) duas camadas com o horário da passagem do satélite; (d) duas camadas com o ângulo zenital médio; (e) duas camadas de emissividade e (f) duas camadas das condições de céu claro (disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod11a2).

Neste estudo foram utilizadas quatro camadas, sendo uma banda de temperatura de superfície diurna em graus Kelvin, duas bandas de emissividade e uma camada com o horário da passagem do satélite, dos produtos MOD11A2/MYD11A2, todas com resolução espacial de 1 km (Tabela 3).

Em seguida foi necessário converter o número digital de cada *pixel* das imagens nas unidades de cada banda (reflectância, graus, graus Kelvin e horas). Essa conversão, apesar de simples, por muitas vezes pode acabar sendo negligenciada por usuários menos atentos, acarretando falhas na aplicação desses produtos. Para realizar essas conversões fez-se necessário o uso de fatores para conversão, que podem ser multiplicadores ou adicionais. Esses fatores estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Para o produto MODIS 09A1 foi utilizado um fator multiplicador, e para o produto MODIS 11A2 utilizou-se fatores multiplicadores e adicionais, disponibilizados pelo *U.S. Geological Survey*, setor responsável pelas imagens MODIS, disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov>.

Tabela 2. Descrição das camadas do produto MODIS 09A1

Camada	Descrição	Unidade	Resolução		Fator de conversão
			Temporal	Espacial	
1	Banda 1 (0,620 – 0,670 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
2	Banda 2 (0,841 – 0,876 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
3	Banda 3 (0,459 – 0,479 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
4	Banda 4 (0,545 – 0,565 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
5	Banda 5 (1,230 – 1,250 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
6	Banda 6 (1,628 – 1,652 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
7	Banda 7 (2,105 – 2,155 μm)	Reflectância	Diária	500 m	0,0001
9	Ângulo Zenital Solar	Graus	Diária	1 km	0,01

Tabela 3. Descrição das camadas do produto MODIS 11A1

Camada	Descrição	Unidade	Resolução		Fator de conversão
			Temporal	Espacial	
1	Temperatura da superfície diurna	° Kelvin	Diária	1 km	0,02
3	Horário da passagem	Hora	Diária	1 km	0,1
9	Banda 31 (10,780 – 11,280 μm)	–	Diária	1 km	0,002+0,49
10	Banda 32 (11,770 – 12,270 μm)	–	Diária	1 km	0,002+0,49

Foram utilizadas no total 282 imagens da área de estudo, da cena h14_v09 (Figura 5), do período compreendido entre 2005 e 2015, conforme apresentado nas Tabelas 4 a 14.

A escolha desse recorte temporal deveu-se ao fato de ser o período no qual se iniciaram as coletas de dados climatológicos de campo em escala temporal horária, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que são necessários para a aplicação do algoritmo SEBAL (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica). Esse conjunto de dados de campo foi obtido da estação automática de Arcoverde, localizada na coordenada 08° 26' S e 37° 03' O.

Das imagens de satélite utilizadas, 164 foram do satélite Terra e 118 do satélite Aqua. Como critério de seleção dessas imagens, foram utilizadas as informações presentes nos arquivos descritores das imagens MODIS, que trazem um percentual de qualidade das imagens, com base na cobertura de nuvens e em ruídos ou falhas presentes em cada imagem. Dessa forma, observou-se que para a área de estudo, as imagens que apresentavam o percentual de qualidade superior a 55% estariam aptas a serem utilizadas na estimativa da evapotranspiração.

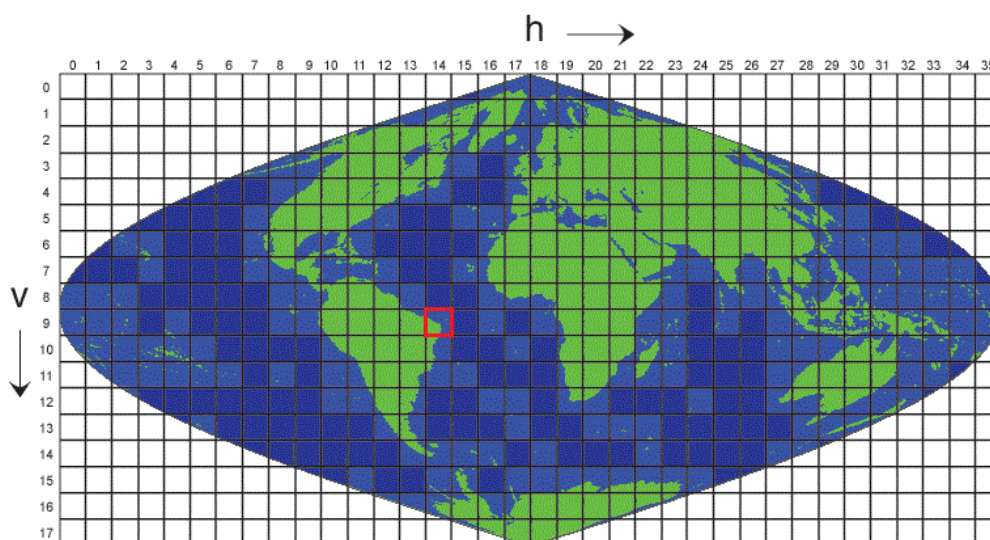
**Figura 5.** Localização da cena compreendendo a BHRI.

Tabela 4. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2005

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
1	01/01/05	Terra	11	15/04/05	Aqua	21	16/10/05	Aqua
2	09/01/05	Terra	12	23/04/05	Terra	22	24/10/05	Aqua
3	17/01/05	Terra	13	12/07/05	Terra	23	09/11/05	Aqua
4	25/01/05	Terra	14	05/08/05	Aqua	24	17/11/05	Aqua
5	02/02/05	Terra	15	21/08/05	Aqua	25	03/12/05	Terra
6	18/02/05	Aqua	16	06/09/05	Terra	26	11/12/05	Terra
7	26/02/05	Terra	17	14/09/05	Terra	27	19/12/05	Terra
8	06/03/05	Terra	18	22/09/05	Terra	28	27/12/05	Aqua
9	22/03/05	Aqua	19	30/09/05	Aqua	Total	28 Imagens	
10	07/04/05	Aqua	20	08/10/05	Terra			

Tabela 5. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2006

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
29	01/01/06	Terra	39	23/04/06	Aqua	49	24/10/06	Terra
30	09/01/06	Terra	40	20/07/06	Terra	50	01/11/06	Aqua
31	25/01/06	Aqua	41	28/07/06	Terra	51	09/11/06	Terra
32	18/02/06	Terra	42	21/08/06	Aqua	52	17/11/06	Aqua
33	26/02/06	Terra	43	29/08/06	Terra	53	25/11/06	Terra
34	06/03/06	Terra	44	14/09/06	Terra	54	03/12/06	Terra
35	14/03/06	Terra	45	22/09/06	Terra	55	11/12/06	Terra
36	22/03/06	Aqua	46	30/09/06	Terra	56	19/12/06	Terra
37	07/04/06	Terra	47	08/10/06	Aqua	57	27/12/06	Terra
38	15/04/06	Aqua	48	16/10/06	Terra	Total	29 Imagens	

Tabela 6. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2007

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
58	09/01/07	Terra	69	12/07/07	Terra	80	24/10/07	Terra
59	17/01/07	Terra	70	28/07/07	Aqua	81	01/11/07	Terra
60	25/01/07	Terra	71	05/08/07	Terra	82	09/11/07	Aqua
61	02/02/07	Terra	72	13/08/07	Aqua	83	17/11/07	Aqua
62	26/02/07	Aqua	73	21/08/07	Aqua	84	03/12/07	Terra
63	22/03/07	Aqua	74	29/08/07	Aqua	85	11/12/07	Terra
64	30/03/07	Terra	75	14/09/07	Terra	86	19/12/07	Terra
65	07/04/07	Terra	76	22/09/07	Aqua	87	27/12/07	Terra
66	15/04/07	Aqua	77	30/09/07	Aqua	Total	30 imagens	
67	23/04/07	Aqua	78	08/10/07	Terra			
68	25/05/07	Aqua	79	16/10/07	Terra			

Tabela 7. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2008

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
88	01/01/08	Aqua	98	16/05/08	Aqua	108	23/10/08	Terra
89	09/01/08	Terra	99	17/06/08	Terra	109	31/10/08	Aqua
90	17/01/08	Aqua	100	27/07/08	Aqua	110	08/11/08	Terra
91	02/02/08	Terra	101	20/08/08	Aqua	111	16/11/08	Terra
92	18/02/08	Terra	102	28/08/08	Terra	112	24/11/08	Aqua
93	26/02/08	Terra	103	05/09/08	Aqua	113	02/12/08	Aqua
94	05/03/08	Terra	104	13/09/08	Aqua	114	10/12/08	Terra
95	13/03/08	Terra	105	21/09/08	Aqua	115	26/12/08	Terra
96	29/03/08	Terra	106	29/09/08	Aqua	Total	28 Imagens	
97	22/04/08	Terra	107	15/10/08	Terra			

Tabela 8. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2009

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
116	01/01/09	Terra	124	30/03/09	Terra	132	09/11/09	Terra
117	09/01/09	Aqua	125	07/04/09	Terra	133	17/11/09	Terra
118	25/01/09	Terra	126	01/05/09	Aqua	134	25/11/09	Terra
119	02/02/09	Terra	127	02/06/09	Terra	135	03/12/09	Terra
120	10/02/09	Aqua	128	08/10/09	Terra	136	27/12/09	Terra
121	26/02/09	Aqua	129	16/10/09	Terra	Total	21 Imagens	
122	14/03/09	Terra	130	24/10/09	Aqua			
123	22/03/09	Terra	131	01/11/09	Terra			

Tabela 9. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2010

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
137	18/02/10	Terra	145	02/06/10	Terra	153	01/11/10	Terra
138	26/02/10	Terra	146	13/08/10	Terra	154	09/11/10	Aqua
139	06/03/10	Aqua	147	21/08/10	Aqua	155	17/11/10	Terra
140	14/03/10	Aqua	148	29/08/10	Aqua	156	03/12/10	Aqua
141	22/03/10	Aqua	149	22/09/10	Aqua	157	19/12/10	Terra
142	15/04/10	Terra	150	30/09/10	Aqua	158	27/12/10	Terra
143	01/05/10	Aqua	151	08/10/10	Terra	Total	22 Imagens	
144	09/05/10	Aqua	152	16/10/10	Terra			

Tabela 10. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2011

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
159	01/01/11	Terra	168	22/03/11	Aqua	177	28/07/11	Terra
160	09/01/11	Terra	169	30/03/11	Terra	178	22/09/11	Aqua
161	17/01/11	Aqua	170	23/04/11	Aqua	179	30/09/11	Aqua
162	25/01/11	Aqua	171	09/05/11	Aqua	180	24/10/11	Terra
163	02/02/11	Aqua	172	17/05/11	Aqua	181	09/11/11	Terra
164	18/02/11	Aqua	173	25/05/11	Aqua	182	25/11/11	Terra
165	26/02/11	Aqua	174	02/06/11	Aqua	183	11/12/11	Terra
166	06/03/11	Terra	175	26/06/11	Aqua	184	27/12/11	Terra
167	14/03/11	Terra	176	12/07/11	Terra	Total	26 Imagens	

Tabela 11. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2012

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
185	01/01/12	Terra	195	30/04/12	Terra	205	13/09/12	Aqua
186	02/02/12	Terra	196	08/05/12	Aqua	206	21/09/12	Terra
187	26/02/12	Terra	197	16/05/12	Terra	207	15/10/12	Aqua
188	05/03/12	Aqua	198	01/06/12	Terra	208	23/10/12	Aqua
189	13/03/12	Aqua	199	17/06/12	Aqua	209	31/10/12	Aqua
190	21/03/12	Aqua	200	11/07/12	Terra	210	08/11/12	Terra
191	29/03/12	Terra	201	19/07/12	Aqua	211	16/11/12	Aqua
192	06/04/12	Aqua	202	04/08/12	Terra	212	10/12/12	Aqua
193	14/04/12	Terra	203	28/08/12	Aqua	213	18/12/12	Terra
194	22/04/12	Aqua	204	05/09/12	Aqua	Total	29 Imagens	

Tabela 12. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2013

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
214	01/01/13	Aqua	222	30/03/13	Aqua	230	24/10/13	Terra
215	09/01/13	Terra	223	07/04/13	Terra	231	01/11/13	Aqua
216	17/01/13	Terra	224	23/04/13	Aqua	232	25/11/13	Aqua
217	25/01/13	Aqua	225	02/06/13	Aqua	233	03/12/13	Terra
218	26/02/13	Aqua	226	18/06/13	Aqua	234	11/12/13	Terra
219	06/03/13	Terra	227	14/09/13	Terra	235	27/12/13	Terra
220	14/03/13	Aqua	228	22/09/13	Terra	Total	22 Imagens	
221	22/03/13	Terra	229	16/10/13	Terra			

Tabela 13. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2014

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
236	01/01/14	Terra	244	26/06/14	Aqua	252	01/11/14	Terra
237	17/01/14	Terra	245	28/07/14	Terra	253	09/11/14	Terra
238	10/02/14	Terra	246	29/08/14	Terra	254	25/11/14	Terra
239	15/04/14	Terra	247	14/09/14	Terra	255	03/12/14	Terra
240	23/04/14	Terra	248	22/09/14	Aqua	256	11/12/14	Terra
241	17/05/14	Terra	249	30/09/14	Terra			
242	25/05/14	Terra	250	16/10/14	Terra	Total	21 Imagens	
243	02/06/14	Terra	251	24/10/14	Terra			

Tabela 14. Descrição das imagens obtidas para o ano de 2015

Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite	Imagem	Data	Satélite
257	07/04/15	Terra	266	28/07/15	Aqua	275	01/11/15	Terra
258	15/04/15	Terra	267	21/08/15	Terra	276	09/11/15	Aqua
259	23/04/15	Terra	268	29/08/15	Aqua	277	17/11/15	Aqua
260	01/05/15	Terra	269	06/09/15	Aqua	278	25/11/15	Aqua
261	09/05/15	Aqua	270	14/09/15	Terra	279	03/12/15	Terra
262	17/05/15	Aqua	271	22/09/15	Aqua	280	11/12/15	Aqua
263	18/06/15	Aqua	272	30/09/15	Terra	281	19/12/15	Aqua
264	26/06/15	Aqua	273	16/10/15	Aqua	282	27/12/15	Terra
265	04/07/15	Terra	274	24/10/15	Aqua	Total	26 Imagens	

3.2 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Essa etapa consistiu no mapeamento do uso e ocupação do solo com base em imagens de satélite. Para o mapeamento dos tipos de uso e ocupação do solo na BHRI foram utilizadas quatro imagens, sendo três do Landsat 5 e uma do Landsat 8, tendo em vista que essas imagens possuem resolução espacial que permite uma boa identificação dos usos do solo. Essas imagens foram selecionadas devido ao fato de apresentar baixo percentual de cobertura de nuvens. As imagens obtidas são da órbita 215, pontos 66 e 67, dos dias 02/11/2005, 10/11/2008, 29/09/2010 e 14/11/2015. As imagens utilizadas são de meses com comportamento pluviométrico semelhante. Esse critério foi definido com o objetivo de minimizar os efeitos da variabilidade sazonal da precipitação sobre os diferentes tipos de uso e ocupação do solo na bacia.

Após a etapa de aquisição das imagens, todas foram georreferenciadas e posteriormente foi gerado o mosaico das duas cenas mencionadas que compõem a bacia.

Para o mapeamento dos tipos de uso e ocupação do solo, foram testados diferentes métodos de classificação de imagem (classificação supervisionada e não supervisionada). Com os testes realizados optou-se pelo método de classificação não supervisionado, utilizando o classificador ISOSEG, que é um algoritmo que procura agrupar regiões por atributos estatísticos de médias, matriz de covariância e a área (OLIVEIRA e MATAVELI, 2013).

3.3 Estimativa da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL

A estimativa da evapotranspiração foi realizada mediante a aplicação do algoritmo SEBAL, que por sua vez, pode ser dividido em duas partes: (a) cômputo do balanço de energia e (b) determinação da evapotranspiração (ET).

A primeira parte consiste na execução de etapas para a obtenção do saldo de radiação instantâneo (R_n). Para tanto, foi necessário o cálculo do albedo da superfície, de índices de vegetação, da temperatura de superfície e das radiações incidentes e emitidas. A Figura 6 apresenta o fluxograma ilustrativo das etapas para a obtenção do saldo de radiação na superfície.

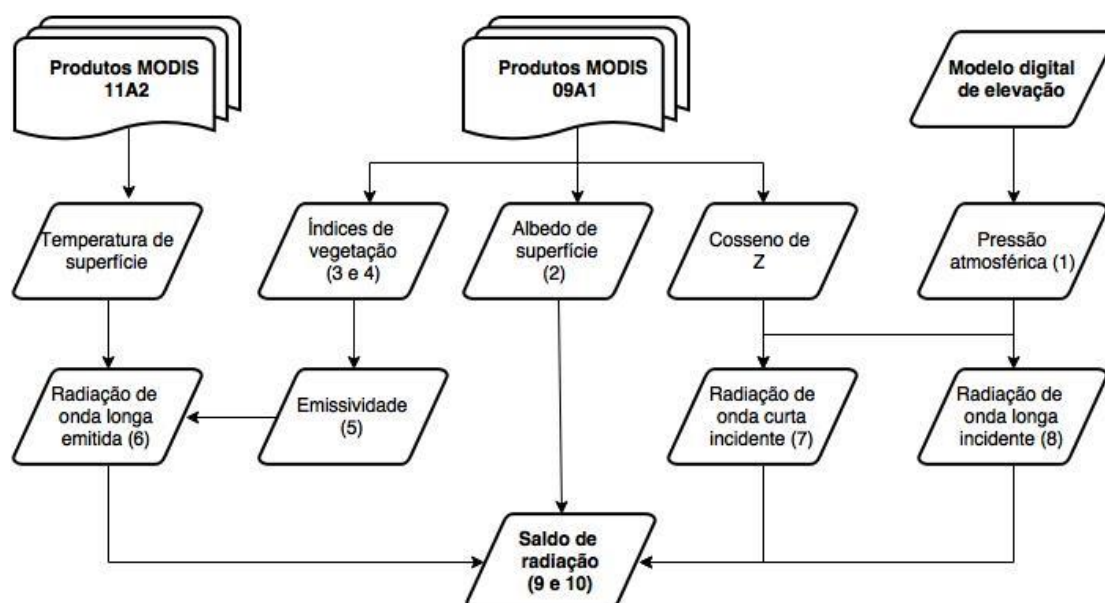


Figura 6. Fluxograma das etapas para a obtenção do saldo de radiação a superfície e entre parênteses as equações utilizadas.

Para o cálculo do albedo de superfície (equação 2), a banda 5 das imagens MODIS 09A1 não foi utilizada, pois em algumas delas foram identificadas falhas. Essas

falhas são “linhas” horizontais presentes em toda a imagem, como podem ser observadas na Figura 7. Com a exclusão das bandas 5 no cômputo do albedo, os coeficientes de ponderação (W_b) utilizados para estimar esse parâmetro foram modificados (W_b^*), conforme as recomendações de Trezza et al. (2013), como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15. Coeficientes de ponderação para o cálculo do albedo de superfície

Banda	Comprimento de onda (μm)	W_b	W_b^*
1	0,620 - 0,670	0,215	0,215
2	0,841 - 0,876	0,215	0,266
3	0,459 - 0,479	0,242	0,242
4	0,545 - 0,565	0,129	0,129
5	1,230 - 1,250	0,101	0,000
6	1,628 - 1,652	0,062	0,112
7	2,105 - 2,155	0,036	0,036

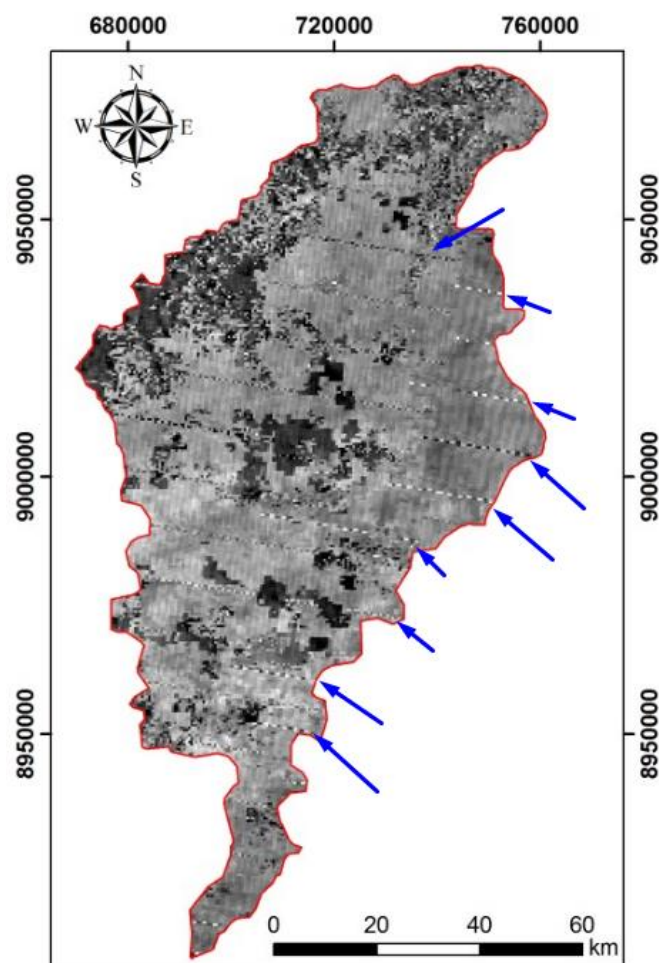


Figura 7. Exemplo das falhas encontradas na banda 5 dos produtos 09A1.

A Tabela 16 apresenta as principais equações utilizadas para a obtenção do saldo de radiação instantâneo. As equações estão numeradas conforme as etapas ilustradas na Figura 6, com exceção da temperatura da superfície e o cosseno de Z que foram calculados a partir dos fatores de conversão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 16. Equações para a obtenção do saldo de radiação na superfície

Equação	Nº	Referência
$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{T_{ar,k} - 0,0065h}{T_{ar,k}} \right)^{5,26}$	(1)	ASCE-EWRI (2005)
$a_{sup} = \sum_{b=1}^n [\rho_b W_b]$	(2)	Tasumi et al. (2008)
$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_2 - \rho_1)}{(L + \rho_2 + \rho_1)}$	(3)	Huete (1988)
$IAF = - \frac{\ln \left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59} \right)}{0,91}$	(4)	Allen et al. (2002)
$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF$	(5)	Allen et al. (2002)
$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 \sigma T_{sup,k}^4$	(6)	Allen et al. (2002)
$R_{oc,inc} = ScosZ\tau_{sw}d_r$	(7)	Allen et al. (2002)
$R_{ol,atm} = \varepsilon_a \sigma T_{sup,c}^4$	(8)	Allen et al. (2002)
$R_n = (1 - a_{sup})R_{oc,inc} + R_{ol,atm} - R_{ol,emi} - (1 - \varepsilon_0)R_{ol,atm}$	(9)	Allen et al. (2002)
$R_{n24h} = (1 - a_{sup})R_{oc,24h,medida} - 110\tau_{24h}$	(10)	Bastiaanssen et al. (1998)

Devido ao fato da extensa quantidade de estudos que aplicaram essa metodologia, neste trabalho todas as equações necessárias para obtenção do saldo de radiação na superfície foram condensadas em uma única tabela, que contém referências onde cada uma delas pode ser consultada com maior grau de detalhamento.

A Figura 8 mostra o fluxograma da segunda parte da execução do algoritmo SEBAL, que trata sobre os cálculos dos fluxos de calor no solo, calor sensível e calor latente e, por fim, a estimativa da evapotranspiração.

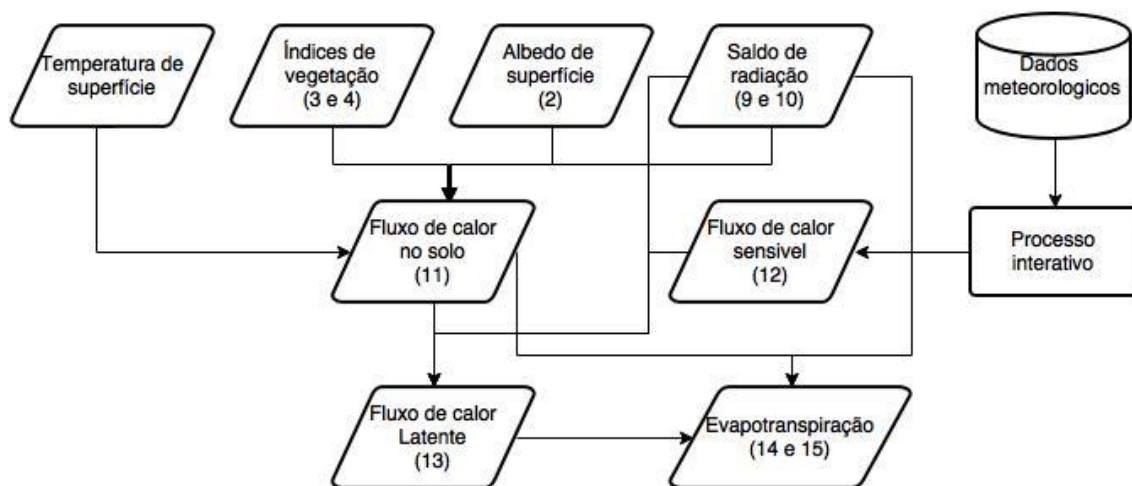


Figura 8. Fluxograma das etapas para a estimativa da evapotranspiração e entre parênteses as equações utilizadas.

De posse das estimativas realizadas na primeira parte da execução do SEBAL, calculou-se o fluxo de calor no solo, a partir da temperatura de superfície, do NDVI, do albedo e do saldo de radiação instantâneo. Na sequência foram calculados os fluxos de calor e, por fim, a evapotranspiração.

Dentre essas etapas, o cálculo do fluxo de calor sensível (H) (W/m^2) é a principal etapa para a obtenção da evapotranspiração. A variável H (equação 12) é estimada com base na velocidade do vento e na temperatura da superfície, sendo obtida usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis ($Z_1 = 0,1m$ e $Z_2 = 2m$) (BASTIAANSEN et al., 1998). Essa calibração se dá por meio de um processo iterativo para a obtenção das constantes de calibração “a” e “b” (equação 12), bem como para as correções de estabilidade da atmosfera e da velocidade e resistência aerodinâmica. Esse processo iterativo foi repetido n vezes até que a condição de estabilidade seja obtida (Figura 9).

Com o processo iterativo concluído e o H calculado, utilizou-se a equação 13 para determinar o fluxo de calor latente (W/m^2), que compreende o fluxo de massa para a atmosfera proveniente da evaporação mais a transpiração das plantas de dada área, ao mesmo tempo em que representa a taxa de calor cedido à água da superfície (solo e/ou planta), para que a mesma evapotranspire. Posteriormente, foi calculada a fração evaporativa instantânea (equação 14) e a evapotranspiração diária (equação 15), conforme a Tabela 17.

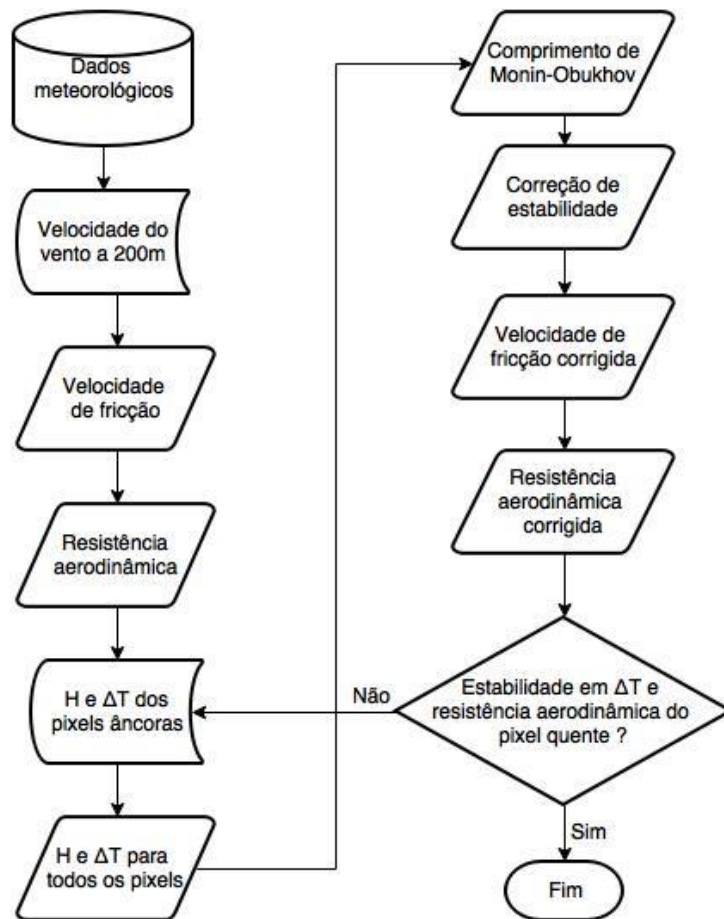


Figura 9. Fluxograma ilustrativo do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível (H).

Tabela 17. Equações para a estimativa da evapotranspiração

Equação	Nº.	Referência
$G = \left[\frac{T_{sup,c}}{a_{sup}} (0,0038a_{sup} + 0,0074a_{sup}^2)(1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n$	(11)	Bastiaanssen (2000)
$H = \frac{\rho_a c_p (a + bT_s)}{r_{ah}}$	(12)	Bastiaanssen et al. (1998)
$LE = R_n - G - H$	(13)	Bastiaanssen et al. (1998)
$FE_i = \frac{LE}{R_n - G}$	(14)	Bastiaanssen et al. (1998)
$ET_{24h} = 0,035FE_i R_{n24h}$	(15)	Coelho (2016)

Com a evapotranspiração diária calculada seus valores foram agregados em valores mensais, conforme a metodologia aplicada por Morse et al. (2000) e Coelho (2016), como apresentado na equação 16:

$$ET_m = \frac{ET_{24h}}{ET_0} ET_{0_mês} \quad (16)$$

sendo ET_m a evapotranspiração real mensal, ET_{24h} a evapotranspiração real diária, ET_0 a evapotranspiração de referência diária e $ET_{0_mês}$ a evapotranspiração de referência acumulada mensal. Para o cálculo da ET_0 foi utilizada a equação 17 padronizada pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (ALLEN et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ar,c} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (17)$$

sendo ET_0 a evapotranspiração de referência (mm/dia); R_n é o saldo de radiação ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); $T_{ar,c}$ é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$) a uma altura de 2 m; u_2 é a velocidade do vento (m/s) a uma altura de 2 m; e_s a pressão de saturação do vapor à temperatura (kPa); e_a a pressão atual do vapor de água (kPa); γ a constante psicrométrica (adimensional); e Δ a tangente à curva de pressão de vapor, em $T_{ar,c}$.

3.5 Automatização do algoritmo SEBAL (SEBAL-A)

Como pôde ser visto no item anterior, a aplicação do algoritmo SEBAL requer a execução de diversas etapas. Esse processo é relativamente demorado e um simples equívoco em qualquer das etapas acarreta erros no resultado final da estimativa.

Com isso, para a aplicação do algoritmo SEBAL, para uma grande quantidade de imagens, como por exemplo, 50, 100 ou mais, torna-se imprescindível que o pesquisador possua vasta experiência na utilização dessa metodologia, bem como, uma grande quantidade de horas de trabalho.

Nesse sentido, automatizar a aplicação do algoritmo SEBAL pode ser uma alternativa para otimizar a estimativa da evapotranspiração para uma grande série de imagens. Além disso, a automatização é uma poderosa técnica para minimizar a ocorrência de erros ao longo do processamento.

Nesse sentido, a aplicação do algoritmo SEBAL para o presente trabalho foi totalmente automatizada, utilizando-se uma rotina computacional desenvolvida no *software* MATLAB[®]. Com essa rotina computacional, o SEBAL automatizado (SEBAL-A) pode ser executado para uma quantidade indefinida de imagens, desde que estejam no formato de entrada e que os dados de campo estejam devidamente organizados. Para este trabalho, o SEBAL-A foi aplicado para 282 imagens, com um tempo de execução médio de 3 minutos por imagem.

Para o início do processamento das imagens foi necessária uma preparação dos dados de entrada para a aplicação do algoritmo (imagens e dados de campo, como temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa, radiação). A Figura 10 apresenta um esquema das etapas de preparação dos dados de entrada, na qual todos os produtos MODIS e o modelo digital de elevação são convertidos do seu formato original (TIF ou HDF) para o formato ASCII.

Dessa forma, é possível realizar a importação dessas imagens para o *software* MATLAB[®], onde, a velocidade de processamento dessas imagens é otimizada. Em relação aos dados de campo, eles também devem ser tabulados em uma planilha única, sendo cada variável inserida em uma coluna. Com os dados devidamente preparados, a rotina é executada para a obtenção da evapotranspiração, conforme apresentado na Figura 10.

3.5.1 Determinação dos *pixels* âncoras e aplicação do SEBAL-A

Ao longo do desenvolvimento da rotina do SEBAL-A, a etapa onde foi necessária uma maior quantidade de horas de trabalho foi a de seleção dos *pixels* âncoras de referência (um *pixel* quente e um *pixel* frio). Esses *pixels* são utilizados para a obtenção das constantes de calibração “a” e “b”, utilizadas para a obtenção do fluxo de calor sensível (H), conforme apresentado anteriormente.

Para automatizar a seleção dos *pixels* âncoras, tomou-se como base o trabalho de Silva (2013), que propõe uma metodologia para selecionar automaticamente os *pixels* âncoras necessários para a aplicação do SEBAL. Contudo, essa metodologia precisou ser melhorada e ampliada para a utilização de um número maior de imagens.

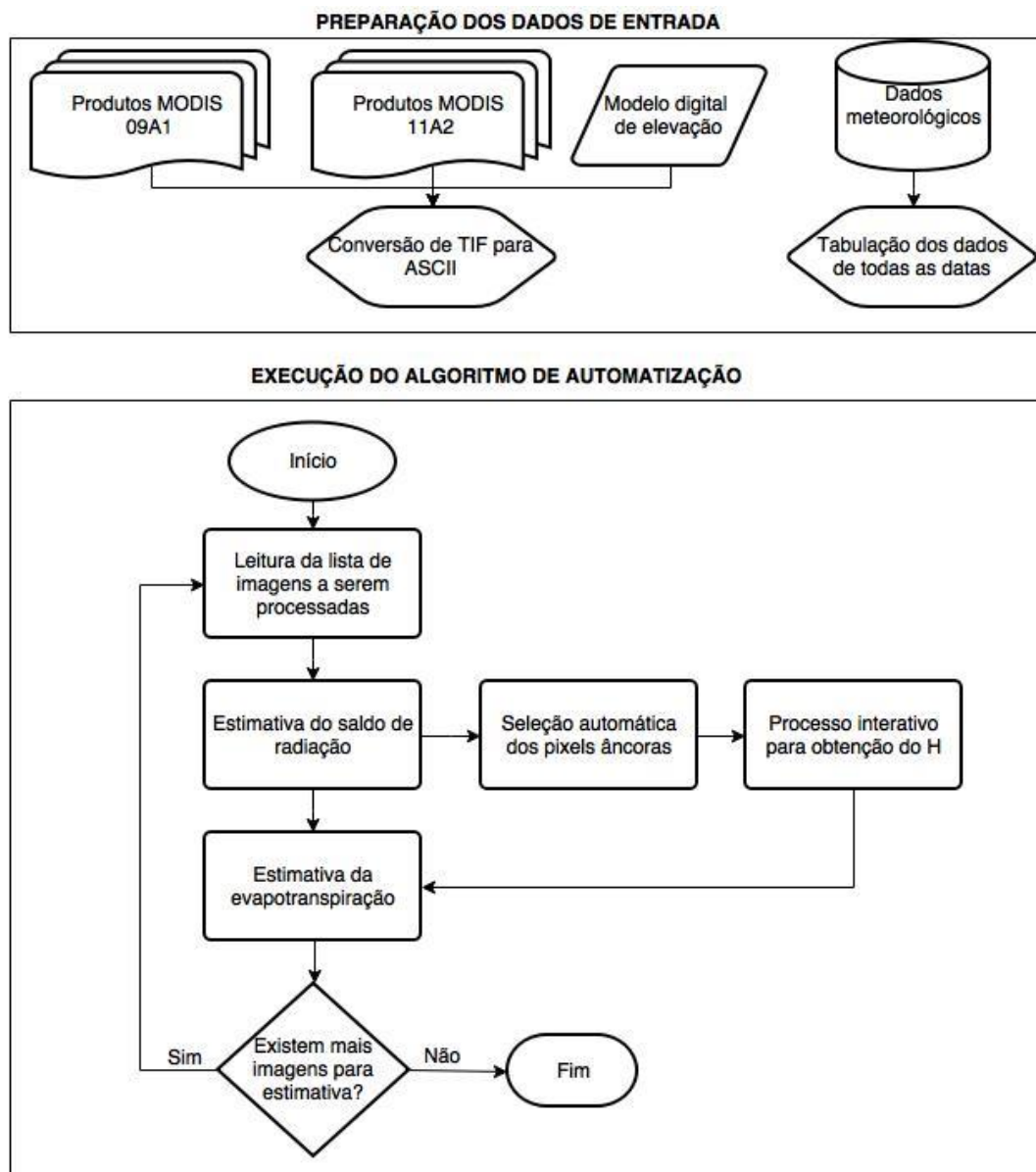


Figura 10. Fluxograma da rotina computacional para a aplicação do SEBAL-A.

Dessa forma, no presente trabalho, a seleção automática dos *pixels* âncoras ocorreu a partir de duas etapas:

- 1) A primeira etapa consiste em delimitar uma faixa de valores para as três variáveis utilizadas como critérios de seleção, que são: (a) NDVI, (b) albedo e (c) temperatura de superfície para cada uma das imagens;
- 2) A segunda etapa consistiu de agrupar todos os *pixels* elegíveis a âncora em dois grupos: (a) no 1º. grupo são selecionados todos os *pixels* da imagem que satisfazem os critérios de seleção; (b) o 2º. grupo consistiu no refinamento na

seleção do 1º. grupo, com o objetivo de diminuir a quantidade de *pixels* elegíveis. Essas duas etapas serão descritas com mais detalhes a seguir.

A principal dificuldade encontrada para automatizar a seleção dos *pixels* âncoras foi à definição dos limites para a criação dos limites inferiores e superiores dos valores das variáveis utilizadas como critérios na seleção dos *pixels* âncoras (NDVI, albedo e temperatura de superfície). Esses limites permitiram a criação de uma imagem derivada dessas variáveis (máscaras), contendo apenas os *pixels* que estão dentro de uma faixa de valores pré-estabelecidos.

Na grande maioria das aplicações do SEBAL, não há a informação dos critérios utilizados para escolha dos *pixels* âncoras. Dessa forma, a escolha desses *pixels* torna-se bastante subjetiva. Por sua vez, em alguns trabalhos é possível observar que esse processo de seleção foi realizado a partir de critérios pré-definidos, como nos casos dos estudos de Silva (2013) e Araújo (2014). Nesse último estudo, por exemplo, foi definido que os *pixels* frios deveriam possuir os seguintes valores de parâmetros biofísicos: $NDVI > 0,8$, temperatura de superfície $< 20^{\circ}C$ e albedo $< 0,2$.

Contudo, para este trabalho, as definições de limites fixos como os apresentados acima não tiveram sucesso, em virtude da grande quantidade de imagens utilizadas, e devido a BHRI possuir alta variabilidade espaço-temporal nos valores dos parâmetros biofísicos supracitados. Esse comportamento é característico da região semiárida, onde é comum meses do ano em que o valor do NDVI máximo encontrado em uma imagem varia entre 0,7 e 0,8 (período chuvoso), enquanto em outros meses do ano, os valores de NDVI não ultrapassam 0,6 (período seco).

Para resolver esse problema, este estudo propôs que os limites para a criação das máscaras de cada parâmetro biofísico fossem definidos individualmente para cada imagem utilizada na estimativa da evapotranspiração. Para isso, em cada variável é realizada a distribuição dos seus valores e obtidos os seus quartis (que são pontos estabelecidos em intervalos regulares a partir de uma função de distribuição). Os valores obtidos em cada quartil foram utilizados como os limites para a criação das máscaras. A Tabela 18 apresenta os valores dos quartis utilizados como limites de cada variável para o conjunto de imagens utilizadas neste estudo.

Tabela 18. Definição dos limites para criação das máscaras

Variável	Limites	
	<i>Pixel frio</i>	<i>Pixel quente</i>
Albedo	< 2°. quartil	> 3°. quartil
NDVI	> 4°. quartil	> 0,10 e < 1°. quartil
Temperatura de superfície	< 1°. quartil	> 3°. quartil

Com a definição desses limites, as máscaras apenas com os valores de NDVI, albedo e temperatura de superfície, dentro dos limites definidos para a seleção dos *pixels* âncoras deram origem a seus respectivos produtos. As Figuras 11a–c apresentam um exemplo das máscaras criadas para cada variável utilizada na seleção do *pixel* âncora frio. Para esse exemplo, a seleção do *pixel* âncora frio foi selecionado de acordo com seguinte critério: NDVI > 0,83609 (valor do 4° quartil da imagem do NDVI), albedo < 0,17652 (valor do 2°. quartil da imagem do albedo) e temperatura de superfície < 27,7484 °C (valor do 1° quartil da imagem de temperatura).

Com as máscaras criadas do NDVI, albedo e temperatura de superfície, um teste *pixel a pixel* foi realizado com as três máscaras para identificar quais *pixels* obedeciam aos limites das três variáveis. A partir desse teste foram definidos os *pixels* que compõem o 1°. grupo e que podem ser escolhidos como âncoras. A Figura 11d apresenta o resultado desse teste *pixel a pixel*. Nesse exemplo foram selecionados 159 *pixels* para o primeiro grupo de *pixels* elegíveis como âncoras.

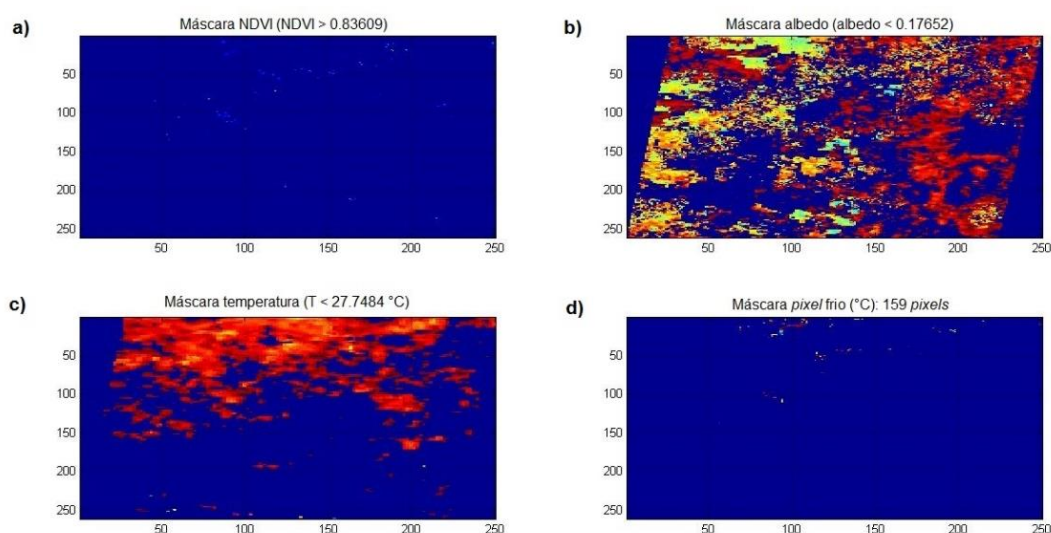


Figura 11. Exemplo das máscaras e do primeiro grupo de *pixels* elegíveis a âncoras: (a) máscara do NDVI, (b) máscara do albedo, (c) máscara da temperatura de superfície e (d) 1° grupo de *pixels* elegíveis como âncoras.

Após a definição do 1º. grupo de *pixels* elegíveis como âncoras, foi realizado um refinamento desse grupo utilizando a definição dos quartis, conforme apresentado anteriormente. Com a obtenção dos quartis para o 1º. grupo foram definidos novos limites para o refinamento desses valores. Nessa etapa foram excluídos todos os *pixels* com valores superiores ao 1º. quartil, no caso do *pixel* frio, e também excluídos todos os valores inferiores ao 3º. quartil, no caso do *pixel* quente.

A Figura 12a mostra a distribuição do 1º grupo de *pixels* elegíveis como âncoras. Nessa figura pode-se observar o posicionamento de cada quartil: 1º quartil (Q1); 2º quartil (Q2); 3º quartil (Q3); 4º quartil (Q4), bem como a média e o *pixel* frio escolhido. A Figura 12b apresenta o resultado do refinamento do 1º grupo, que resulta no 2º. grupo de *pixels* elegíveis como âncoras, que é um grupo que apresenta uma quantidade menor de *pixels*. É a partir desse segundo grupo que são definidos quais os *pixels* âncoras serão utilizados. Para definir qual *pixel* será utilizado como âncora, seleciona-se o *pixel* que possui valor mais próximo da mediana do 2º grupo, conforme recomendação de Silva (2013).

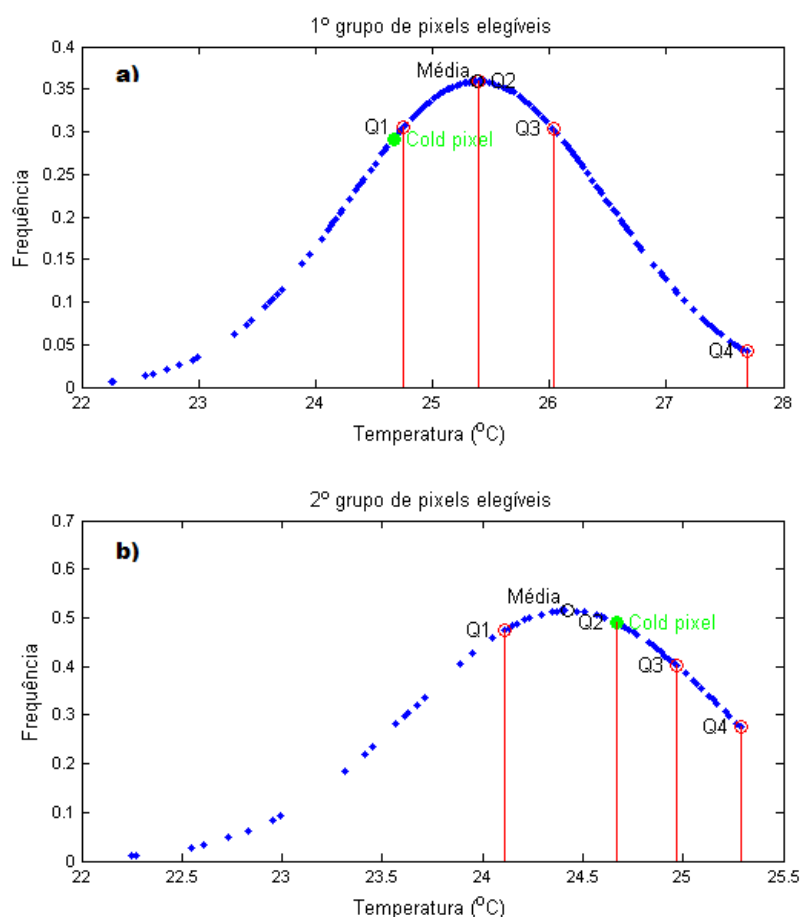


Figura 12. Definição dos quartis e seleção do pixel âncora: (a) distribuição do 1º. grupo de *pixels* elegíveis como âncoras e seus respectivos quartis, (b) distribuição do 2º. grupo de *pixels* elegíveis como âncoras.

A Figura 13 apresenta um fluxograma com todas as etapas necessárias para a escolha automática dos *pixels* âncoras. Após a etapa de seleção dos *pixels* âncoras, foi realizada a execução do SEBAL-A contínua até realizar a estimativa da evapotranspiração, conforme apresentado na Figura10.

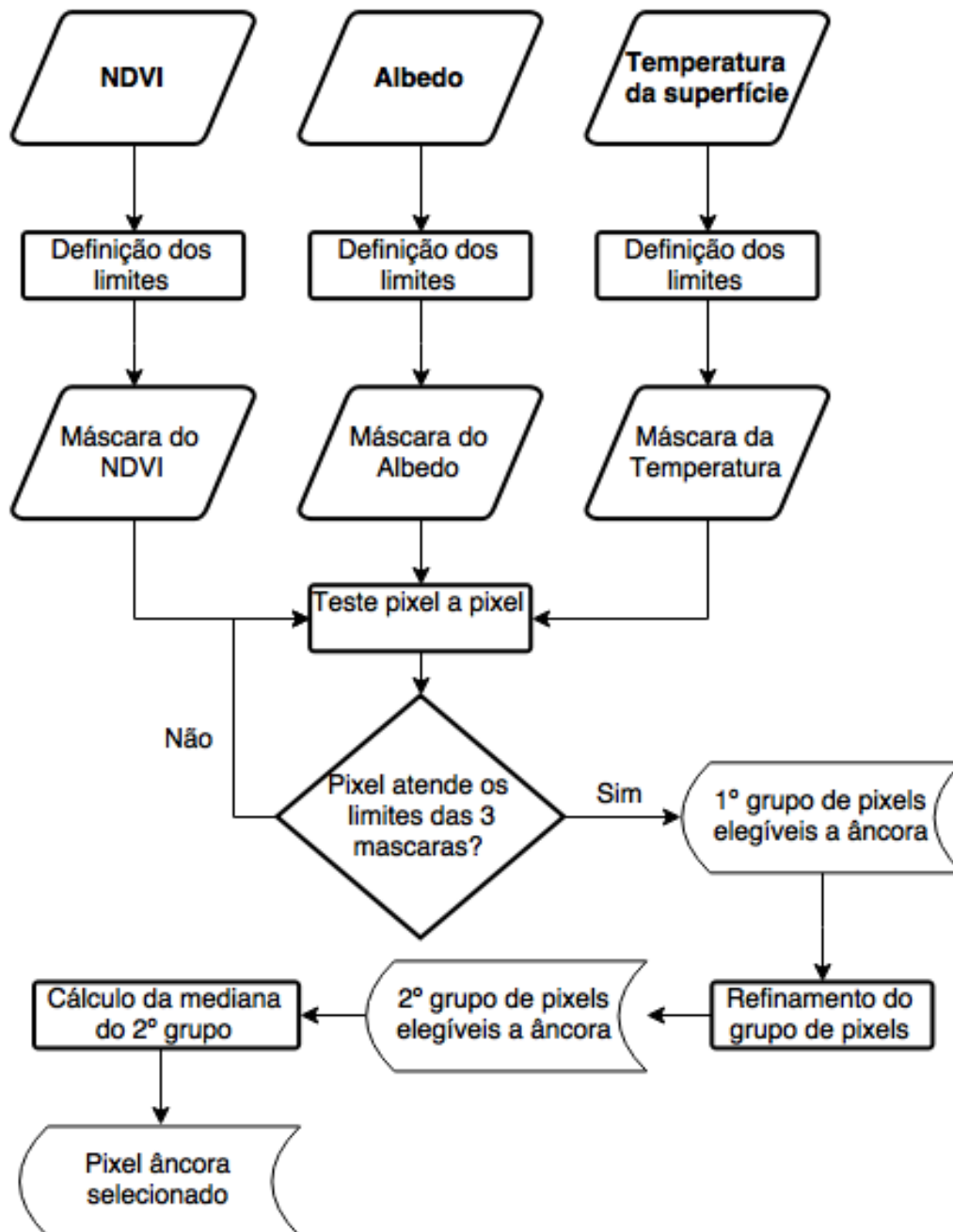


Figura 13. Fluxograma ilustrativo das etapas para a escolha dos pixels âncoras do SEBAL-A.

3.6 Análise comparativa do desempenho do SEBAL-A

Para analisar o desempenho do SEBAL-A foram comparados os seus resultados com as estimativas realizadas por Coelho (2016), que estimou a ET para a porção pernambucana da bacia do rio Ipanema.

Para essa comparação foram utilizados dois métodos: (a) o coeficiente de determinação R^2 (equação 18) e o (b) o RSR (equação 19) que é a normalização da Raiz do erro médio quadrático (RMSE) pelo desvio padrão dos dados utilizados para a comparação. Essa normalização transforma o RMSE em um resultado adimensional, dessa forma foi possível comparar os resultados do RSR entre variáveis de escalas e unidades diferentes, conforme descrito por Moriasi et al. (2007), como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (18)$$

sendo y_i as observações independentes e $\hat{\mu}_i$ os valores simulados.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{média})^2} \right]} \quad (19)$$

sendo $STDEV_{obs}$ o desvio padrão dos dados observados, Y_i^{obs} são os dados observados, Y_i^{sim} são os dados simulados e $Y^{média}$ é a média dos dados observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do rio Ipanema

No mapeamento do uso e ocupação do solo para a BHRI foram identificados quatro tipos: (a) agricultura/pastagem; (b) solo exposto; (c) vegetação arbórea/arbustiva; e (d) vegetação herbácea. A Figura 14 apresenta a distribuição espacial dos tipos de uso do solo na bacia.

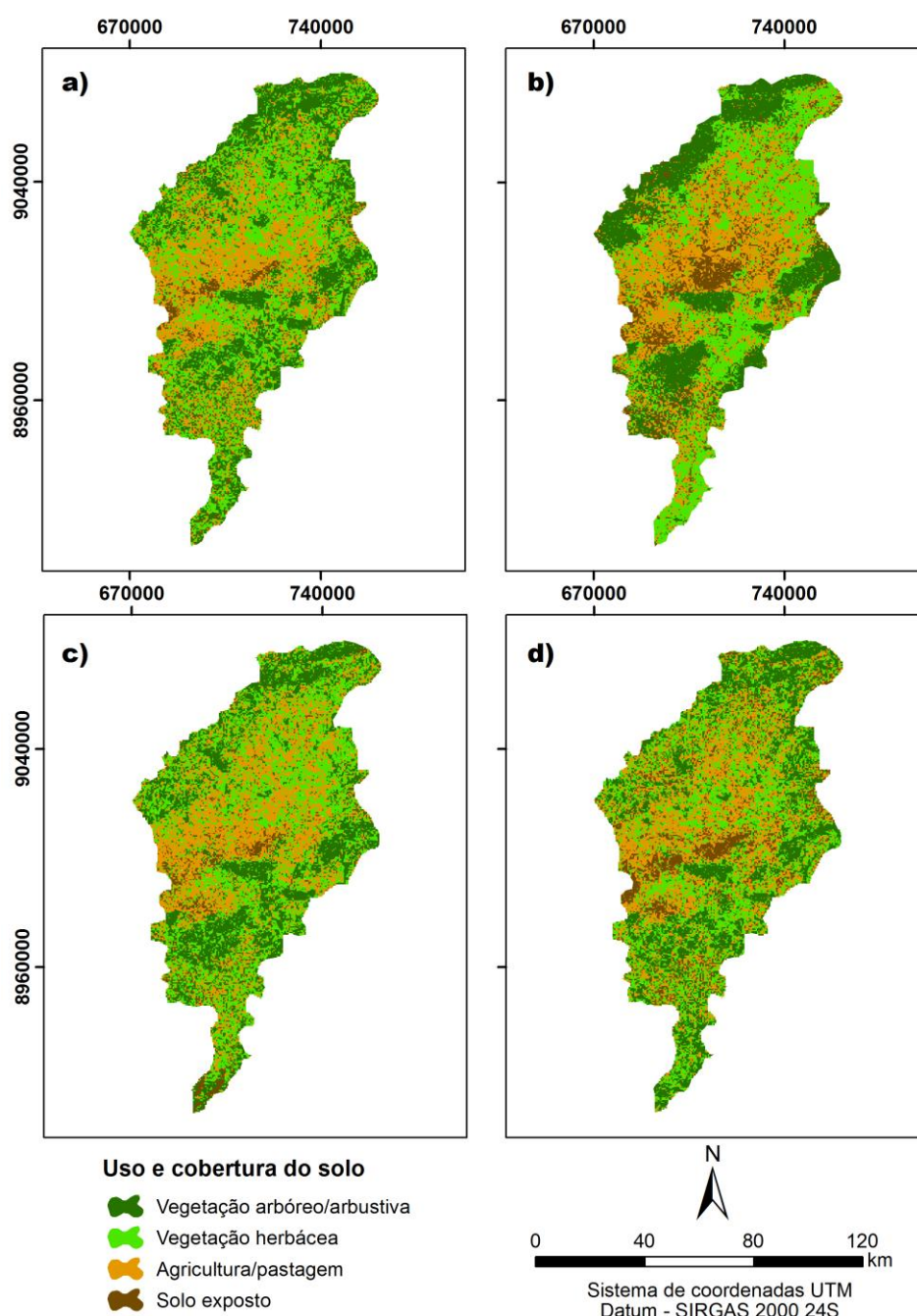


Figura 14. Uso e ocupação do solo da bacia do rio Ipanema (BHRI) para os anos: (a) 2005, (b) 2008, (c) 2010 e (d) 2015.

Observa-se que a classe vegetação arbórea/arbustiva ocorre predominantemente nas áreas mais altas e declivosas, mais precisamente nas regiões próximas ao limite da bacia, bem como em algumas áreas na parte central da bacia. A classe vegetação herbácea, apresenta-se bem distribuída em praticamente toda a bacia em todos os anos analisados, sendo ela uma classe de transição entre a vegetação mais densa e as áreas de agricultura/pastagem e de solo exposto.

As áreas de agricultura/pastagem são predominantes na porção pernambucana da bacia, recobrando boa parte da região central e norte. Observa-se que a classe solo exposto está mais presente próxima às áreas de agricultura/pastagem, sendo mais representativas principalmente na parte central da BHRI.

A Figura 15b apresenta as áreas de vegetação arbórea/arbustiva mais homogêneas em comparação com as outras datas, dando a impressão que há uma maior predominância desse tipo de uso do solo. Entretanto, com base na Tabela 19, pode-se verificar que no ano de 2008 foi identificada a menor representatividade dessa classe nos anos analisados, recobrando 26% da área total da bacia. Já para os anos de 2005, 2010 e 2015 a vegetação arbórea/arbustiva recobria 30%, 28% e 27% da bacia, respectivamente. Observou-se ainda que a classe vegetação herbácea foi aquela com maior diminuição da área ocupada, enquanto a classe solo exposto foi a que teve o maior aumento nos últimos 11 anos.

Tabela 19. Área dos tipos de uso e ocupação da bacia do rio Ipanema

Usos do Solo	2005		2008		2010		2015	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Agricultura/pastagem	2337,24	29	2474,00	31	2515,65	32	2372,80	30
Solo exposto	421,36	5	1001,56	13	485,57	6	904,81	11
Arbórea/arbustiva	2371,90	30	2047,98	26	2190,32	28	2176,57	27
Vegetação herbácea	2823,82	36	2430,78	31	2762,78	35	2500,14	31
TOTAL	7954,32	100	7954,32	100	7954,32	100	7954,32	100

O percentual das áreas de agricultura/pastagem da bacia se manteve praticamente o mesmo nos quatro anos analisados, apresentando um desvio padrão de 83,76 km² entre 2005 e 2015. Para essa classe, a maior variação ocorreu entre os anos de 2005 e 2008, que apresentou um aumento de 6%. Enquanto no período entre 2010 e 2015 foi identificada uma diminuição de 6% desse mesmo tipo de uso do solo (Tabela 20).

A classe solo exposto foi aquela que apresentou as maiores variações ao longo do período analisado, com desvio padrão de 292,38 km². Na Figura 14b pode-se observar um aumento significativo das áreas de solo exposto na região central da bacia. Em 2005 421,36 km² foram classificados como solo exposto, enquanto para 2008 essa área aumentou para 1001,56 km², o que representa um aumento de 138% nesse período. Posteriormente, essa mesma classe apresentou uma diminuição de 52% entre os anos de 2008 e 2010, decrescendo de 1001,56 km² para 485,57 km². No ano de 2015, 904,81 km² foram classificados como solo exposto, representando um aumento de 86% em relação à área mapeada em 2010. Para essa classe, entre os anos de 2005 e 2015 a variação foi de 115% (Tabela 20).

Tabela 20. Variação das classes de uso e ocupação do solo entre os anos de 2005 e 2015

Tipos de uso	2005–2008	2008–2010	2010–2015	2005–2015
Agricultura/pastagem	6%	2%	-6%	2%
Solo exposto	138%	-52%	86%	115%
Vegetação Arbórea/arbustiva	-14%	7%	-1%	-8%
Vegetação herbácea	-14%	14%	-10%	-11%

Essa alta variabilidade espacial da classe solo exposto, deve-se a características do bioma Caatinga que apresenta uma rápida resposta aos eventos pluviométricos (FRANCISCO, 2013). Para tentar entender melhor essa variabilidade, foram analisados os totais pluviométricos de 90 dias anteriores a data de obtenção das imagens utilizadas no mapeamento do uso e ocupação do solo da BHRI. Com isso, foi constatado que nos 90 dias que antecederam a imagem do dia 29/09/2010 foram registrados na bacia 316 mm de chuva, e para as imagens de 02/11/2005, 10/11/2008 e 14/11/2015 foram registrados 93,4, 63,7 e 43,5mm, respectivamente nos 90 dias anteriores a passagem do satélite. Essa diferença na pluviometria registrada pode explicar a baixa representatividade da classe solo exposto nas imagens de 2005 e 2008, bem como, as maiores áreas de vegetação herbácea.

Também foram analisadas quais as áreas da bacia se mantiveram inalteradas ao longo dos 11 anos estudados, ou seja, as áreas da bacia em que não ocorreram mudanças no tipo de uso e cobertura do solo (Figura 15).

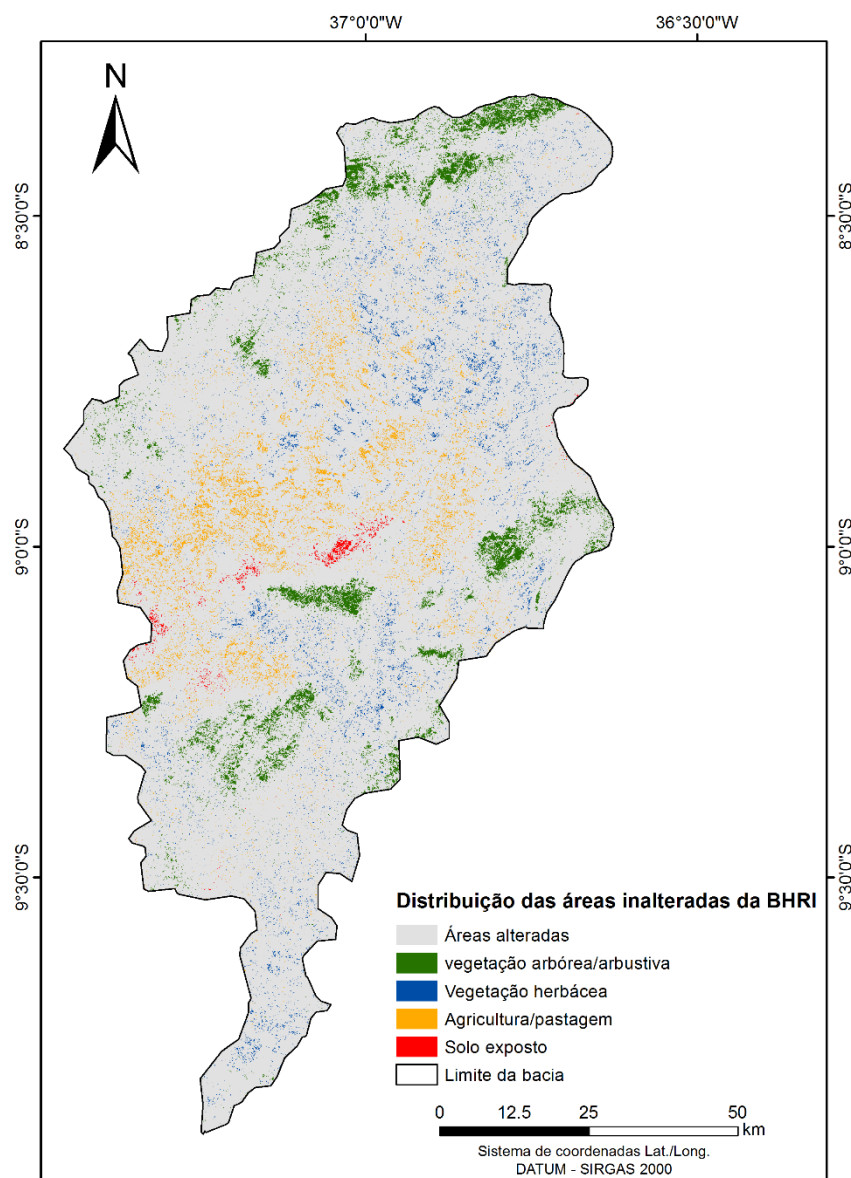


Figura 15. Espacialização das áreas inalteradas na BHRI para o período de 2005 a 2015.

Com base na Figura 15 observou-se que grande parte da BHRI sofreu alterações nas tipologias de uso e ocupação do solo ao longo do período analisado. A Tabela 21 mostra a distribuição das áreas que sofreram alteração, além daquelas inalteradas na bacia, para o período de 2005 a 2015. Nota-se que 91,1% da bacia apresentou modificação no uso do solo ao longo dos anos estudados, e apenas 8,9% (711,8 km²) manteve-se sem alteração. As classes que não apresentaram modificações na sua cobertura vegetal foram: (a) 4,1% para as áreas de vegetação arbórea/arbustiva, (b) 2,6% de Agricultura/pastagem, (c) 1,9% de vegetação herbácea e (d) 0,3% de solo exposto.

Tabela 21. Distribuição das áreas não alteradas e que sofreram alteração na bacia para o período de 2005 a 2015.

Tipos de uso e cobertura do solo	Área (km²)	%
Áreas alteradas	7242,52	91,1
Vegetação Arbórea/arbustiva	327,27	4,1
Vegetação herbácea	150,19	1,9
Agricultura/pastagem	209,59	2,6
Solo exposto	24,75	0,3
Total	7954,32	100,0

Verifica-se que as áreas inalteradas de vegetação herbácea estão distribuídas ao longo de toda a bacia, enquanto que as áreas de solo exposto e agricultura/pastagem concentram-se na parte central da bacia. As áreas de vegetação arbórea/arbustiva por sua vez são distribuídas em “núcleos”, na porção norte da BHRI e na região central e leste.

4.2 Validação do desempenho da rotina do SEBAL-A: comparação da seleção dos *pixels* âncoras e da estimativa da evapotranspiração

Para avaliar o desempenho das estimativas realizadas a partir da rotina desenvolvida para a automatização do SEBAL, foi realizada uma comparação com os resultados obtidos por Coelho (2016), que estimou a evapotranspiração utilizando também o SEBAL para a porção pernambucana da BHRI.

Essa comparação foi realizada em duas etapas distintas. A primeira consistiu na avaliação da seleção automática dos *pixels* âncoras, e a segunda etapa teve por objetivo comparar as estimativas da evapotranspiração real.

A Tabela 22 apresenta os valores dos *pixels* frios escolhidos pelo SEBAL-A e por Coelho (2016). O valor médio para os *pixels* frios selecionados por Coelho (2016) foi de 25,88 °C, enquanto que a média dos *pixels* frios elegidos automaticamente foi de 28,21 °C. Os *pixels* frios selecionados pelo algoritmo foram em média 2,33 °C mais quentes, quando comparados com os valores obtidos de Coelho (2016). A menor variação entre os valores dos *pixels* frios selecionados a partir dos dois métodos foi de 1% na imagem 200, enquanto a maior variação identificada foi de 27% na imagem 186 (Tabela 21). Analisando os valores médios das 37 imagens comparadas, a variação média entre a seleção dos *pixels* frios foi de 9%.

Tabela 22. Comparação entre os valores dos *pixels* frios obtidos pelo SEBAL-A e por Coelho (2016)

Imagem	<i>Pixel</i> frio SEBAL-A	<i>Pixel</i> frio Coelho (2016)	Variação (%)
165	24,67	22,1	12%
166	22,39	21	7%
167	27,63	24,52	13%
169	28,69	27,36	5%
174	23,03	20,5	12%
175	21,39	20,1	6%
177	23,55	21,76	8%
178	27,35	24,37	12%
179	26,71	25,16	6%
180	27,55	25,08	10%
181	27,17	25,74	6%
182	30,49	27,18	12%
183	31,29	29,55	6%
184	29,85	26,54	12%
185	31,07	29,4	6%
186	26,67	20,98	27%
187	27,99	25,5	10%
188	32,15	29,24	10%
189	30,55	28,1	9%
190	29,05	26,79	8%
191	30,05	28,28	6%
192	32,05	28,63	12%
193	29,55	26,26	13%
194	30,11	28,87	4%
195	29,55	25,16	17%
196	29,39	25,56	15%
197	28,53	27,26	5%
199	25,23	23,36	8%
200	21,21	21,37	1%
201	24,03	22,68	6%
202	22,73	21,66	5%
203	25,19	23,29	8%
206	29,25	25,94	13%
208	31,93	28,63	12%
209	34,59	33,24	4%
210	35,17	32,93	7%
211	36,31	33,63	8%

A Figura 16 apresenta a dispersão entre os valores obtidos com a comparação dos *pixels* frios selecionados pelo SEBAL-A e por Coelho (2016). Os resultados mostram que houve uma ótima correlação, apresentando valor de $R^2 = 0,914$ entre os valores escolhidos automaticamente e os *pixels* escolhidos por um especialista.

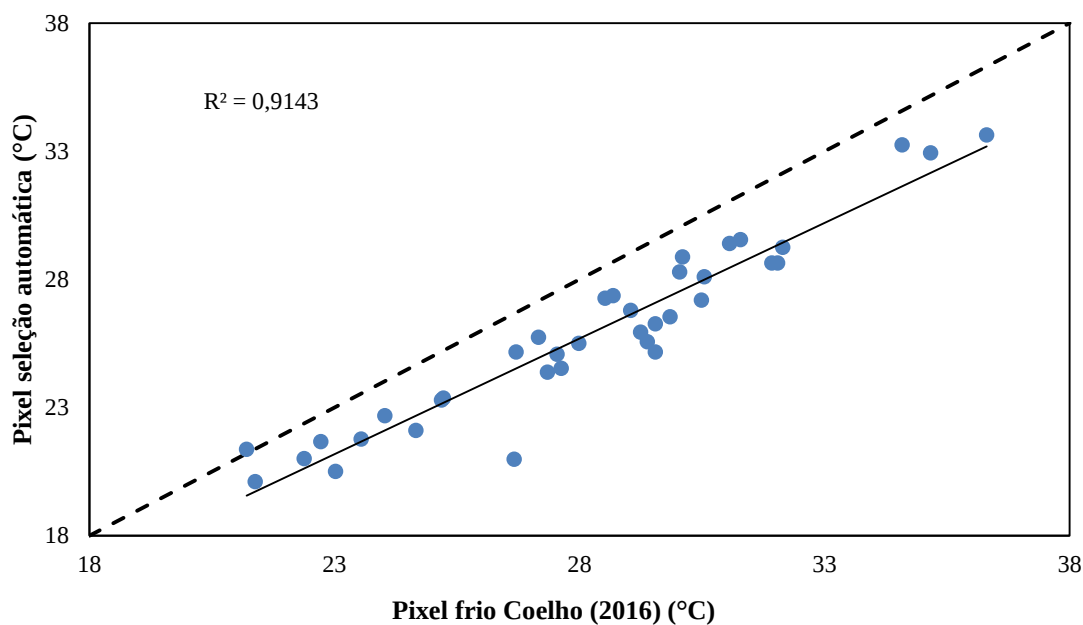


Figura 16. Comparação entre os *pixels* frios selecionados pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).

Na comparação da seleção dos *pixels* quentes, observou-se uma diferença maior entre os valores selecionados automaticamente, com relação aos escolhidos por Coelho (2016). Os resultados mostram que os *pixels* escolhidos de forma automatizada foram em média 3,01 °C mais frios do que os escolhidos manualmente.

A Tabela 23 apresenta a comparação entre os valores dos *pixels* quentes selecionados por Coelho (2016) e pelo SEBAL-A. As duas imagens em que a seleção do *pixel* quente apresentou valores mais discrepantes foram a imagem 200 e a imagem 174.

Na imagem 200, o *pixel* quente selecionado pelo SEBAL-A foi de 6,57 °C mais quente do que o escolhido por Coelho (2016), ou seja, uma diferença de 18%, enquanto que na imagem 174, o SEBAL-A selecionou um *pixel* 5,39 °C mais frio, o que representa uma diferença de 14%. De modo geral, a variação média entre os *pixels* quentes escolhidos foi menor do que a identificada nos *pixels* frios para as 37 imagens, que foi de 7%.

Tabela 23. Comparação dos valores dos *pixels* quentes pela seleção automática e por Coelho (2016)

Imagem	<i>Pixel</i> quente SEBAL-A	<i>Pixel</i> quente Coelho (2016)	Variação (%)
165	42,51	46,88	9%
166	42,77	45,36	6%
167	37,97	43,75	13%
169	43,01	44,93	4%
174	34,33	39,72	14%
175	32,13	34,41	7%
177	33,77	38,24	12%
178	43,43	48,38	10%
179	42,97	46,74	8%
180	41,83	47,06	11%
181	43,25	47,59	9%
182	48,35	52,48	8%
183	46,35	48,56	5%
184	45,39	48,52	6%
185	44,33	47,32	6%
186	43,57	46,91	7%
187	42,77	44,88	5%
188	49,43	51,82	5%
189	43,13	45,61	5%
190	43,75	45,4	4%
191	43,73	45,08	3%
192	46,77	49,68	6%
193	40,91	44,74	9%
194	41,39	44,72	7%
195	41,59	43,98	5%
196	40,07	43,06	7%
197	41,15	43,95	6%
199	37,23	39	5%
200	43,55	36,98	18%
201	38,85	43,04	10%
202	35,41	38,58	8%
203	39,59	44,27	11%
206	46,21	48,52	5%
208	47,29	51,13	8%
209	48,99	54,18	10%
210	51,01	53,18	4%
211	51,45	52,91	3%

A Figura 17 mostra o gráfico de dispersão dos *pixels* quentes obtidos manualmente e de forma automatizada. O valor do R^2 para a comparação entre a seleção

automática dos *pixels* quentes e a seleção realizada por Coelho (2006), também apresentou correlação satisfatória, com valor de $R^2 = 0,817$.

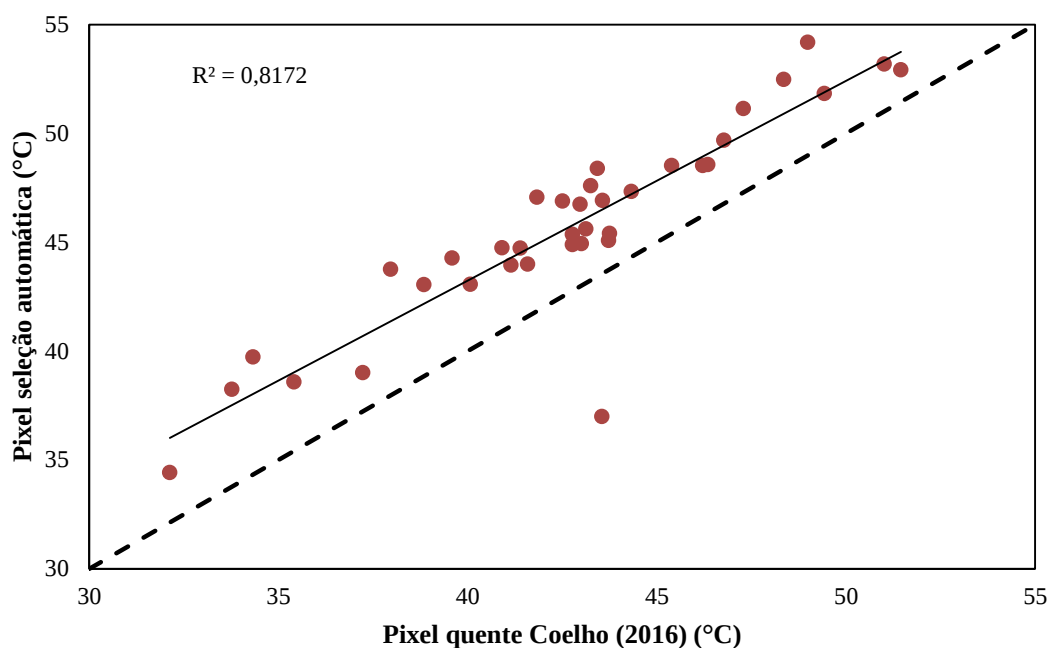


Figura 17. Comparação entre os valores dos *pixels* quentes selecionados pelo SEBAL-A e por Coelho (2016).

Ao analisar a seleção automática dos *pixels* âncoras, pôde-se observar que a rotina de seleção automatizada não seleciona valores próximos aos extremos. A seleção dos *pixels* âncoras utilizando o SEBAL-A mostrou que os valores dos *pixels* frios selecionados apresentaram temperaturas superiores em praticamente todas as imagens utilizadas. Enquanto que, nos *pixels* quentes, as temperaturas foram inferiores aos escolhidos por Coelho (2016).

Assim, verificou-se que a metodologia aplicada para a seleção automática dos *pixels* âncoras mostrou-se satisfatória, tendo em vista que a variação média entre as observações não ultrapassou os 10%. Além disso, foi identificada uma ótima correlação entre os valores obtidos pelo SEBAL-A e pelos valores de Coelho (2016).

Além da comparação entre a seleção dos *pixels* âncoras, realizou-se também uma checagem entre os resultados obtidos na estimativa da evapotranspiração real entre os resultados do SEBAL-A e de Coelho (2016). Para tanto, foram analisados: (a) o valor médio da evapotranspiração diária estimada, (b) o desvio padrão, (c) o coeficiente de determinação R^2 e (d) o RSR. Os resultados obtidos para cada imagem utilizada podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24. Correlação entre as estimativas da evapotranspiração obtidas pelo SEBAL-A e por Coelho (2016)

Imagem	Média (mm)		Desvio Padrão (mm)		R ²	RSR
	Coelho (2016)	SEBAL-A	Coelho (2016)	SEBAL-A		
165	4,57	4,73	0,99	1,36	0,59	0,0036
166	4,32	4,59	1,37	1,37	0,86	0,0017
167	4,00	3,80	0,90	1,67	0,85	0,0039
169	3,81	3,74	1,50	1,79	0,93	0,0014
174	3,51	3,50	0,72	1,13	0,78	0,0033
175	3,32	3,43	0,87	1,14	0,71	0,0027
177	3,75	3,54	0,82	1,37	0,91	0,0033
178	3,85	3,87	1,09	1,50	0,80	0,0043
179	4,51	4,17	1,07	1,59	0,83	0,0032
180	4,29	3,60	0,99	1,63	0,80	0,0045
181	4,73	4,37	1,17	1,74	0,73	0,0035
182	4,06	3,84	1,34	1,75	0,81	0,0025
183	3,31	3,71	1,67	1,74	0,93	0,0014
184	3,60	3,64	0,95	1,38	0,59	0,0037
185	3,54	3,07	1,02	1,45	0,86	0,0033
186	3,13	3,62	1,02	1,29	0,79	0,0028
187	3,36	3,90	1,41	1,46	0,87	0,0020
188	3,99	3,92	1,29	1,59	0,81	0,0022
189	3,35	3,95	1,29	1,31	0,93	0,0020
190	4,35	4,62	1,33	1,82	0,59	0,0035
191	4,45	3,69	0,94	1,60	0,90	0,0047
192	3,74	3,62	1,15	1,52	0,88	0,0021
193	3,86	3,73	1,01	1,65	0,59	0,0043
194	2,86	3,26	1,24	1,40	0,78	0,0024
195	3,04	3,44	1,15	1,52	0,91	0,0023
196	3,20	3,08	0,86	1,28	0,90	0,0026
197	3,50	3,53	1,13	1,32	0,86	0,0017
199	2,36	2,44	0,99	1,25	0,90	0,0018
200	3,18	3,52	0,91	0,88	0,51	0,0032
201	3,51	3,38	0,80	1,08	0,91	0,0022
202	3,51	3,32	1,02	1,30	0,90	0,0020
203	3,81	3,23	0,94	1,42	0,89	0,0037
206	3,03	3,19	1,22	1,43	0,89	0,0016
208	3,16	2,74	1,12	1,46	0,90	0,0025
209	3,56	2,89	1,24	1,85	0,74	0,0040
210	3,54	3,59	1,32	1,59	0,84	0,0019
211	3,25	3,57	1,41	1,53	0,95	0,0013

Das 37 imagens comparadas, em 19 delas os resultados obtidos utilizando o SEBAL-A subestimou a ET, quando comparados aos resultados obtidos por Coelho (2016). Nas outras 18 imagens ocorreu uma superestimativa. A menor diferença entre os valores médios de ET foi identificada na imagem 174, na qual, o SEBAL-A subestimou em 0,01mm a ET estimada por Coelho (2016). Na imagem 191 foi percebida a maior diferença, ou seja, uma subestimativa de 0,76 mm. Os resultados obtidos mostraram que a diferença média para as 37 imagens foi de 0,28 mm.

A correlação média encontrada entre as estimativas de ET realizadas por Coelho (2016) e pelo SEBAL-A foi de 0,82. Nas imagens 165 e 200 foram obtidas as menores correlações, com valor de $R^2 = 0,59$ e $0,51$, respectivamente. Os baixos valores de R^2 identificados nessas duas imagens devem-se a uma maior diferença entre os valores dos *pixels* âncoras selecionados pelo SEBAL-A. Para a imagem 165 a variação do *pixel* frio foi de 12% e para a imagem 200 a variação do *pixel* quente foi de 18%, conforme mostram as tabelas 22 e 23. Já a imagem 211 apresentou o melhor resultado da comparação entre as estimativas da ET realizada pelo SEBAL-A e por Coelho (2016), com $R^2 = 0,95$, para essa imagem a variação dos *pixels* âncora frio e quente foi de 8% e 3%, respectivamente.

Com relação aos resultados obtidos no cálculo do RSR, observou-se que não ocorreram grandes variações nas 37 imagens comparadas. O menor valor de RSR foi identificado na imagem 211 (0,0013), já o maior valor identificado (0,0047) foi obtido na imagem 191. A média do RSR para as 37 imagens foi de 0,0028. De acordo com Moriasi et al. (2007), valores de RSR entre 0,00 e 0,50 demonstram que a estimativa realizada apresentou resultados muito bons.

As diferenças identificadas entre as estimativas da ET devem-se, principalmente, a escolha dos *pixels* âncoras, pois as escolhas desses valores influenciam na determinação dos coeficientes de calibração. Esses coeficientes por sua vez modificam o número de iterações necessárias para o cálculo do fluxo de calor sensível (H), e com isso influenciam diretamente no resultado da ET.

De modo geral, esses resultados mostram que a metodologia aplicada para a automatização do SEBAL obteve resultados satisfatórios ao ser comparado com uma aplicação realizada por um especialista. Entretanto, deve-se destacar que para esse estudo assumiu-se a estimativa realizada por Coelho (2016) como a referência para comparação. Desta forma há a necessidade da realização de uma checagem entre os

valores obtidos estimado pelo SEBAL-A e dados medidos em campo, para então ter uma comparação conclusiva quanto a qualidade da estimativa realizada pelo SEBAL-A.

4.3 Estimativa dos parâmetros biofísicos para a bacia do rio Ipanema

Durante o processo de execução do algoritmo SEBAL foram estimados diversos parâmetros biofísicos, dentre eles foram analisados: (a) *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, (b) temperatura da superfície e (c) saldo de radiação na superfície. Esses parâmetros são indicadores de modificações realizadas no uso e cobertura do solo de uma determinada região (SILVA, 2014).

A Figura 18 apresenta a distribuição espacial do NDVI médio para cada mês do ano na BHRI. Pode-se observar que dois trimestres se destacaram na figura. O primeiro foi de junho a agosto onde se verifica que há a maior predominância de valores mais elevados de NDVI, destacados em tons de verde que representam os valores superiores a 0,6 e estão localizados nas porções sudoeste e sudeste da bacia. Já no trimestre de novembro a janeiro, as áreas com NDVI inferior a 0,4 ganham maior representatividade, destacadas em tons de roxo e ocorrem mais na porção central da bacia.

Esse comportamento do NDVI ao longo do ano deve-se principalmente pela distribuição sazonal da precipitação na BHRI que age de forma intensa no desempenho fenológico da vegetação dessa região. A Figura 19 apresenta um gráfico da pluviometria média mensal para o período de 2000 a 2015 e a média mensal do NDVI.

Pode-se verificar a partir da Figura 19, que a média mais elevada do NDVI para a BHRI ocorreu em julho, ou seja, no mês seguinte ao mais chuvoso do ano. Notou-se que a partir do mês de agosto, a média do NDVI da bacia começou a diminuir, chegando ao seu valor mínimo nos meses de novembro e dezembro. Como esperado, com o aumento da precipitação iniciando-se no mês de janeiro, a vegetação começa a se “recuperar”, aumentando, assim, o NDVI na bacia.

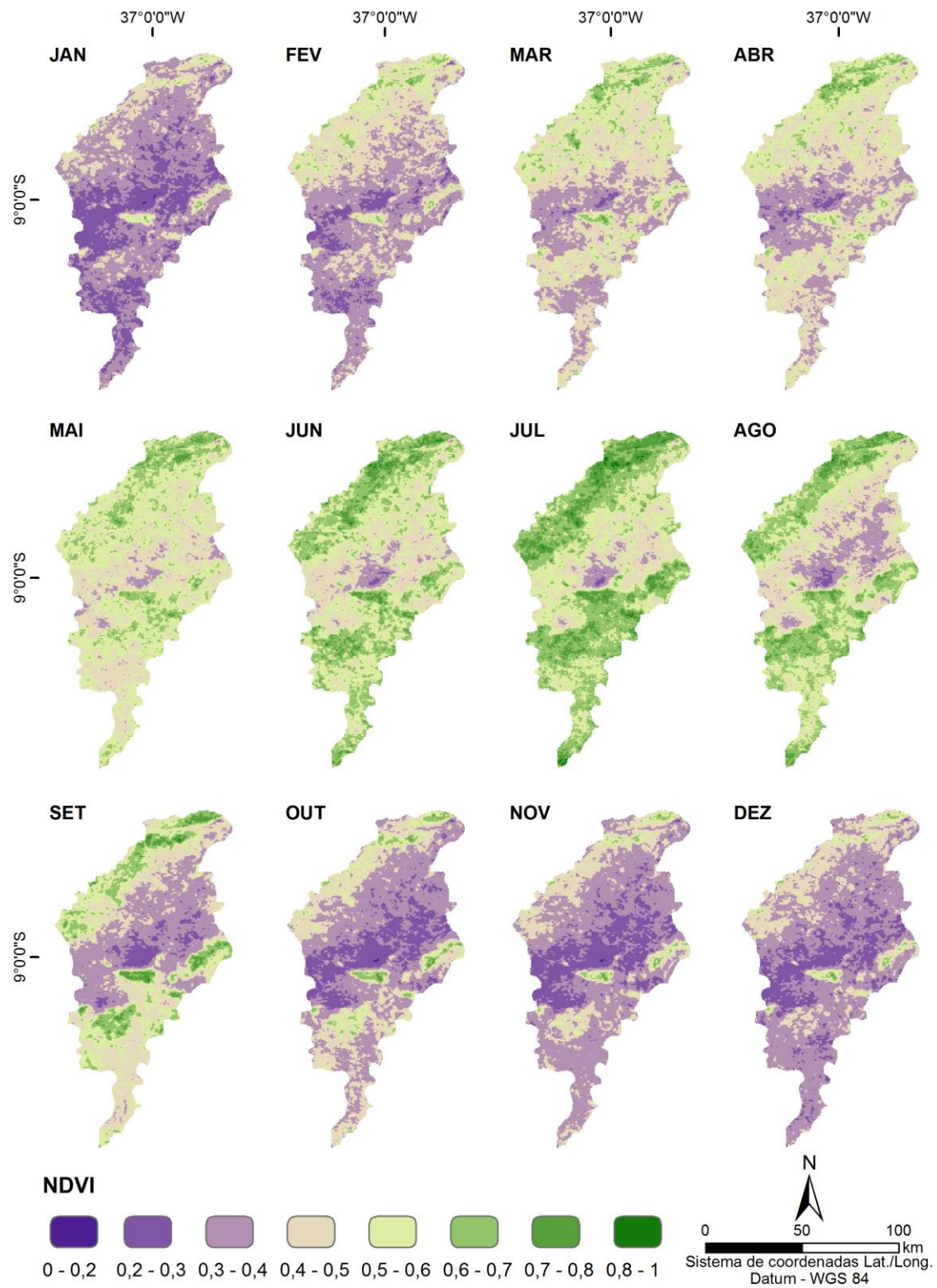


Figura 18. NDVI médio mensal da BHRI para os anos de 2000 a 2015.

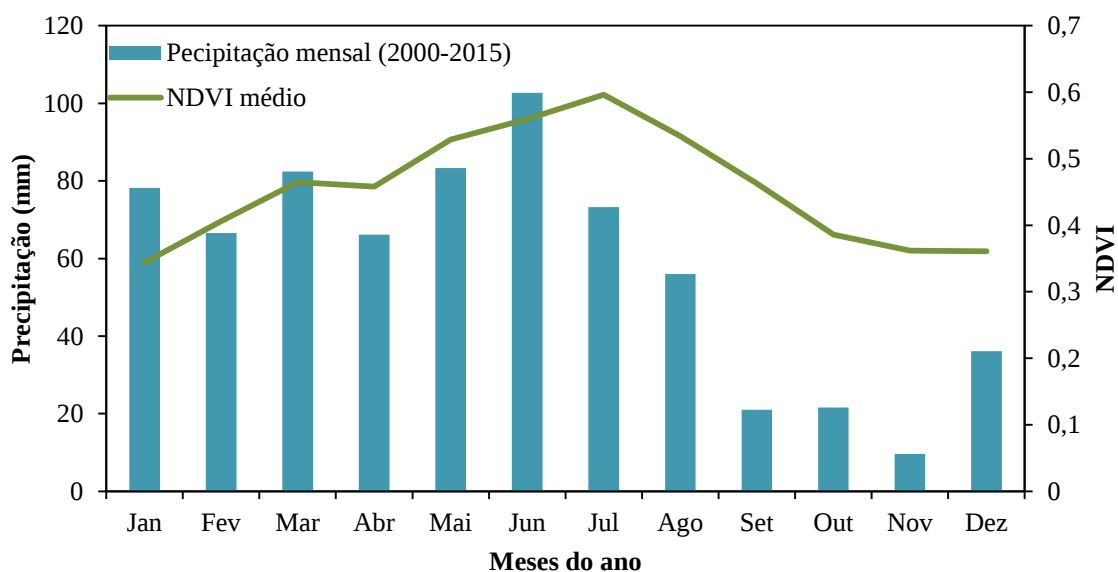


Figura 19. Variabilidade mensal da precipitação e do NDVI na BHRI.

Outro parâmetro biofísico estimado para a BHRI foi a temperatura de superfície. A Figura 18 apresenta a temperatura média mensal da superfície para o período analisado (2005 a 2015). Com base na Figura 20 observou-se que durante praticamente todo o ano há a predominância de áreas na bacia com temperaturas superiores a 36°C, com exceção dos meses de maio a agosto, nas quais as áreas com valores inferiores a 30°C apresentaram-se mais predominantes.

Assim como esperado, as áreas onde houve a predominância dos menores valores de temperatura são aquelas onde ocorre a presença de vegetação arbórea/arbustiva. Essas áreas estão localizadas principalmente próximas aos limites da bacia, conforme mostrado anteriormente. Os resultados obtidos mostraram que os menores valores de temperatura da superfície estimados ocorreram no mês de junho, no qual pode ser visto a presença mais significativa dos valores de temperatura inferiores a 25°C.

Os locais na bacia onde ocorrem as maiores temperaturas são aqueles com a presença de solo exposto e agricultura/pastagem, que estão localizados mais próximos da porção central da bacia. Notou-se que o mês de novembro foi o único que apresentou os maiores valores estimados de temperatura, mais precisamente acima de 45°C.

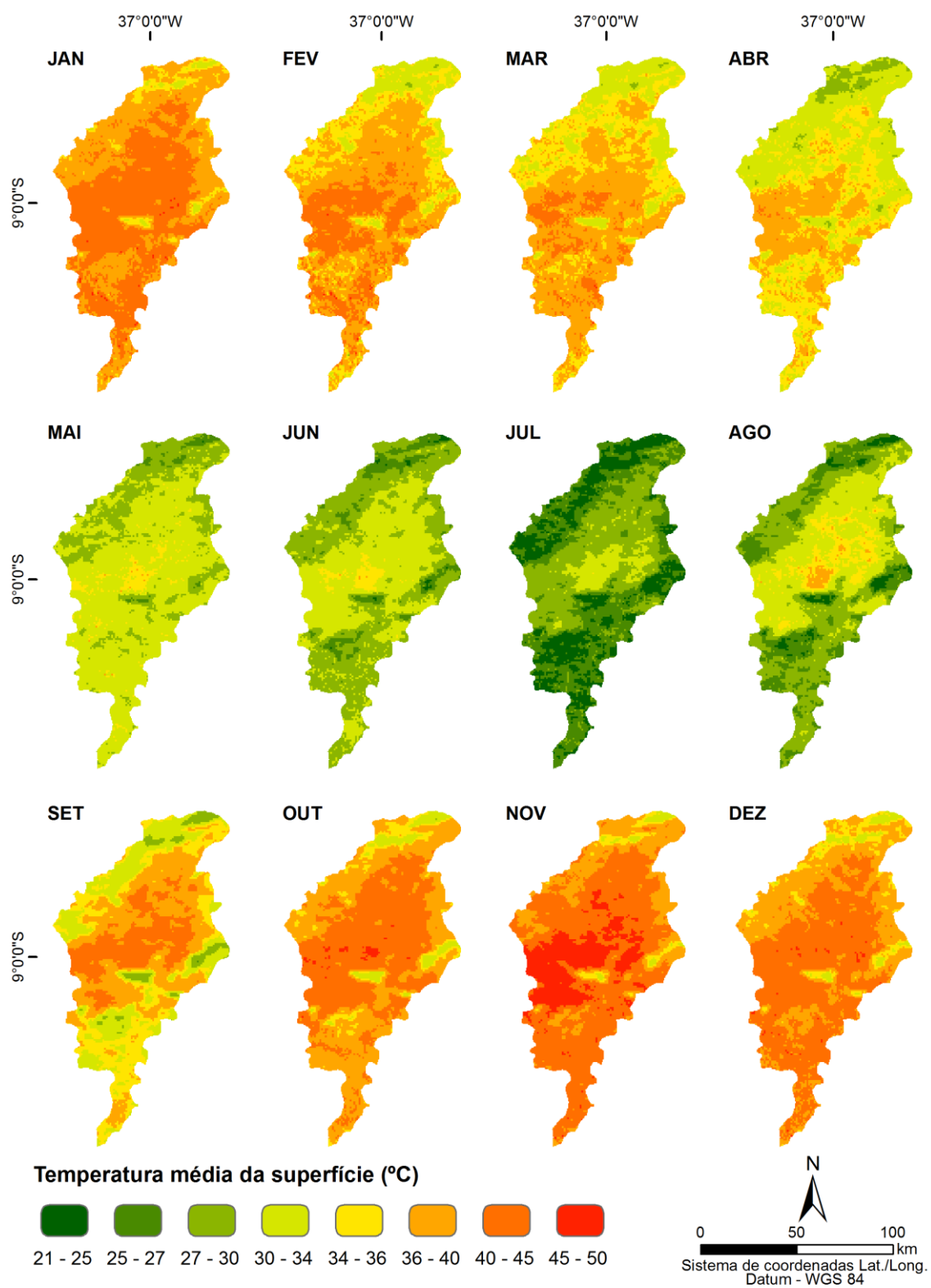


Figura 20. Espacialização da temperatura média mensal da superfície da BHRI para o período de 2005 a 2015.

Apesar da BHRI apresentar uma alta variação da temperatura média mensal superfície (26,7°C em julho a 41,98°C em novembro), a temperatura média mensal do ar para o período analisado manteve-se praticamente constante ao longo do ano, variando de 20,43°C no mês de julho a 25,16°C em dezembro, conforme apresentado na Figura 21.

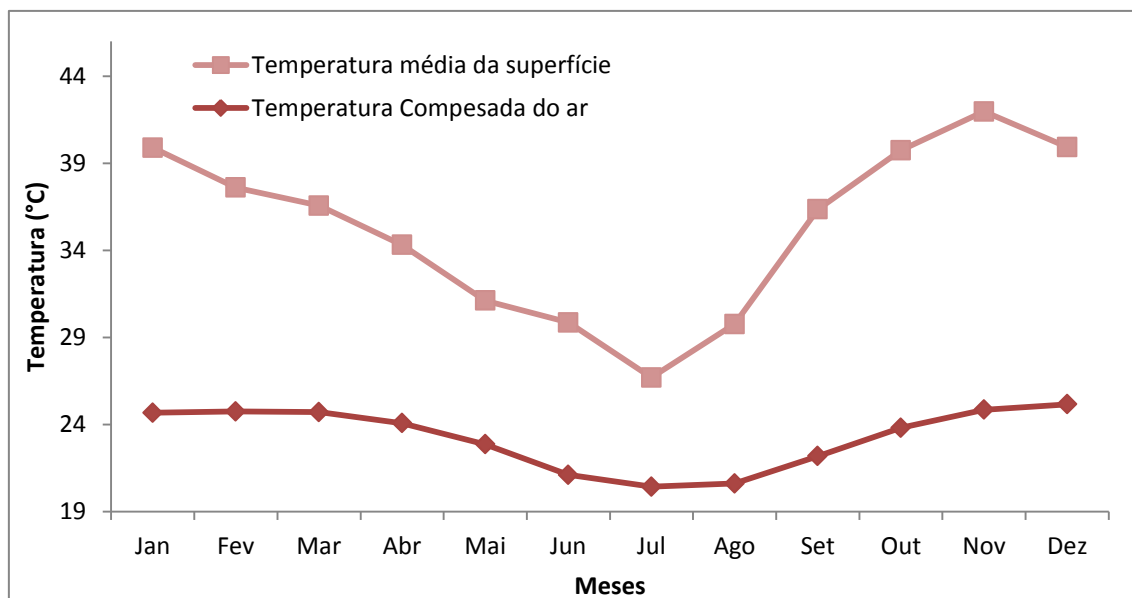


Figura 21. Variação da temperatura mensal da superfície e da temperatura compensada do ar da BHRI para o período de 2000 a 2015.

A variação mais acentuada da temperatura da superfície ao longo do ano deve-se principalmente as mudanças sazonais dos diferentes tipos de uso e cobertura do solo. Por exemplo, com o aumento do vigor da vegetação herbácea nos períodos de maior pluviometria diminuirá os valores de temperatura da superfície, e nos períodos de entressafra da agricultura, quando ocorre a retirada da cobertura do solo ocorreu a elevação da temperatura da superfície nessas áreas.

O comportamento intranual do saldo de radiação diário (R_n) possui semelhanças com os valores observados de temperatura de superfície. A partir da Figura 22 pode-se observar que entre os meses de setembro e março, o R_n apresentou os valores mais elevados, principalmente nos meses de outubro, novembro e dezembro. Nesse período, para grande parte da bacia foram estimados valores superiores a 170 W/m². Em contrapartida, nos meses de maio a julho ocorrem os menores valores de R_n estimados variando de 85 a 150 W/m².

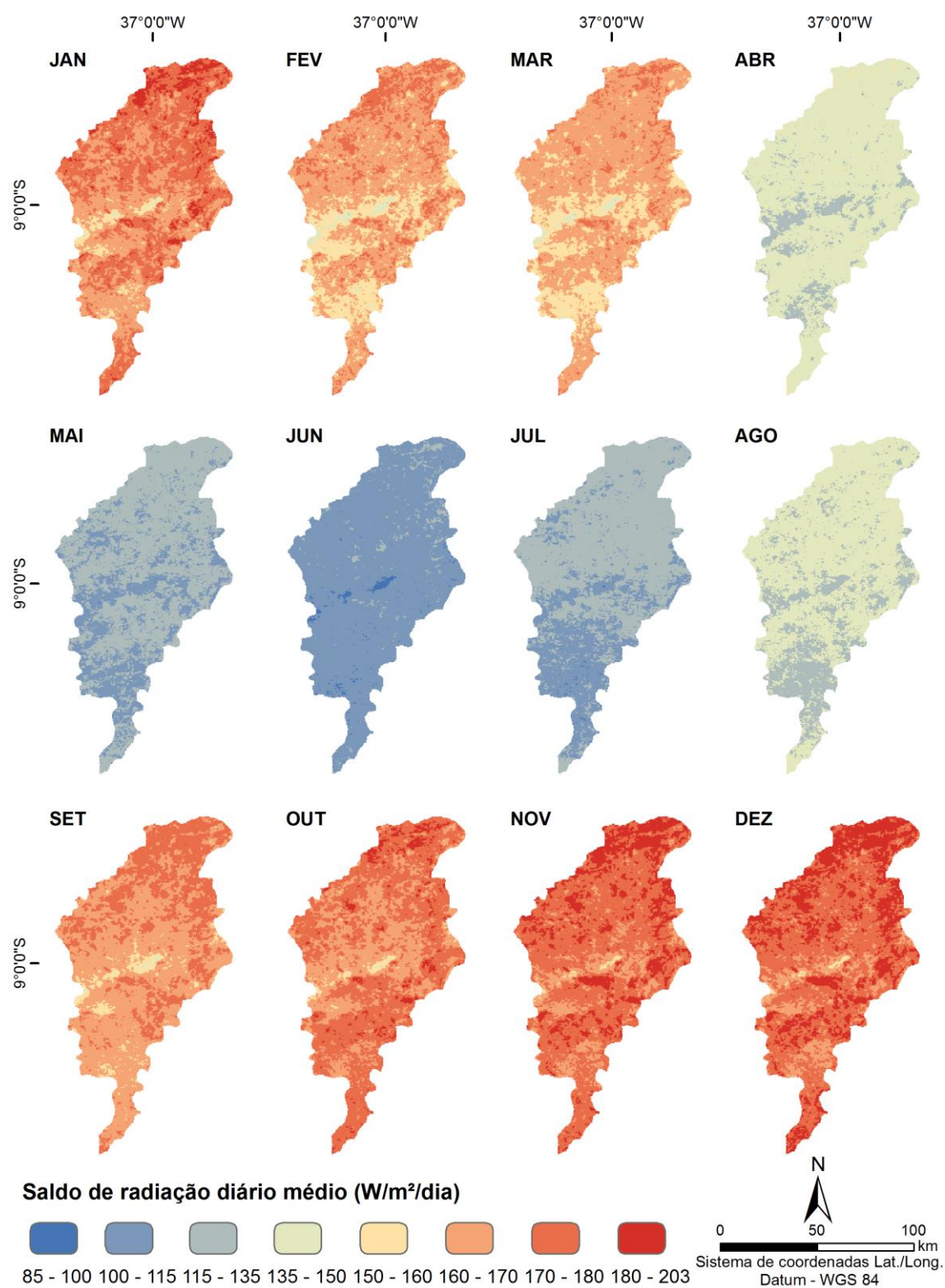


Figura 22. Espacialização do saldo de radiação diário médio da BHRI para o período de 2000 a 2015.

Analisando a Figura 22, destaca-se que as áreas mais vegetadas apresentam um saldo de radiação diário superior as áreas não vegetadas. Isso se deve ao fato de que nas áreas onde não há a presença da vegetação, a radiação é liberada mais rapidamente colaborando com o aumento da temperatura do ar. Já para as áreas vegetadas, a liberação da radiação absorvida ao longo dia se dá de forma mais lenta, fazendo com o R_n mantenha-se elevado.

4.4 Distribuição espacial da evapotranspiração estimada utilizando o SEBAL-A para a bacia do rio Ipanema

Após a estimativa da ET para as 282 imagens, os seus valores diários foram convertidos em ET mensal, conforme apresentado anteriormente na seção 3.4. A Figura 23 traz a espacialização da ET mensal média da BHRI para o período compreendido entre 2005 e 2015.

A distribuição espacial da ET mensal na BHRI ocorreu de forma similar a outros parâmetros biofísicos analisados anteriormente. Notou-se que os maiores valores obtidos para essa bacia ocorreram nas regiões norte e sudeste da mesma, devido ao fato da presença mais significativa da vegetação do tipo arbórea/arbustiva.

Por sua vez, os menores valores estimados de ET mensal concentram-se ao longo do ano na porção central da bacia, onde predominam o solo exposto e áreas de agricultura e pastagem.

Ainda analisando a Figura 23, observa-se que os maiores valores de ET foram estimados no trimestre de novembro a janeiro, com média de 120,55, 140,88 e 140,33 mm/mês, respectivamente. Os resultados mostraram que os menores valores estimados foram obtidos para os meses de maio e junho, que apresentaram valores médios de 88, 80, 79,72 e 92,91 mm/mês, respectivamente. Nota-se que esse comportamento é bem similar ao observado nas estimativas do saldo de radiação diário, onde os trimestres em que são identificados os maiores e menores valores foram os mesmos.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que nos meses de maio, junho e julho são registrados os maiores totais pluviométricos, assim, a quantidade de radiação incidente diminui, devido ao fato da existência de nuvens nesses meses, e, conseqüentemente, menos energia disponível na superfície terrestre, desta forma nesse período, os valores da ET são inferiores aos demais meses.

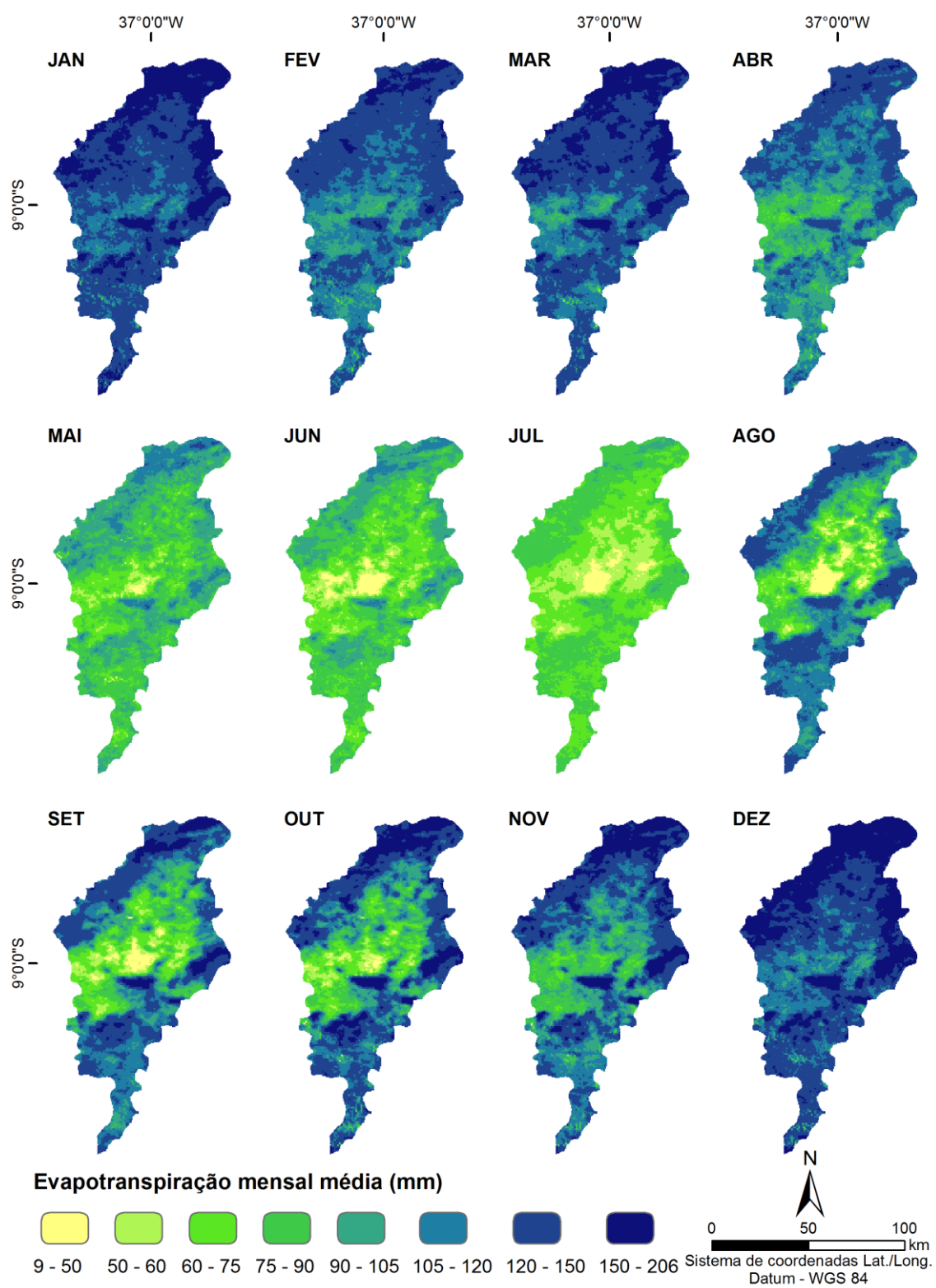


Figura 23. Espacialização da ET mensal média da BHRI para o período de 2000 a 2015.

Com base na Figura 24 pode-se verificar melhor a influência do regime pluviométrico sobre o comportamento da ET mensal nos diferentes tipos de uso e cobertura do solo. Observa-se que a partir do mês março, quando o volume pluviométrico da BHRI começa a aumentar, os valores médios de ET mensal diminuem em uma proporção relativamente similar entre todos os tipos de uso do solo.

Quando a ET mensal atinge o seu menor valor, no mês de junho e o total pluviométrico mensal começa a diminuir ao longo dos meses subsequentes, verificou-se que a ET mensal apresentou um aumento gradativo mês a mês. Entretanto, esse aumento não aconteceu de forma similar em todos os tipos de uso e cobertura do solo da BHRI.

Com base na Figura 24, observa-se que o aumento dos valores de ET mensal nas áreas de vegetação arbórea/arbustiva e vegetação herbácea aconteceu de forma mais rápida, ao passo que nas áreas de agricultura/pastagem e solo exposto esse aumento ocorreu de forma mais lenta. Esse comportamento distinto deve-se basicamente ao fato de que nas áreas vegetadas há uma retenção de umidade maior do que nas áreas onde a ação antrópica foi mais efetiva.

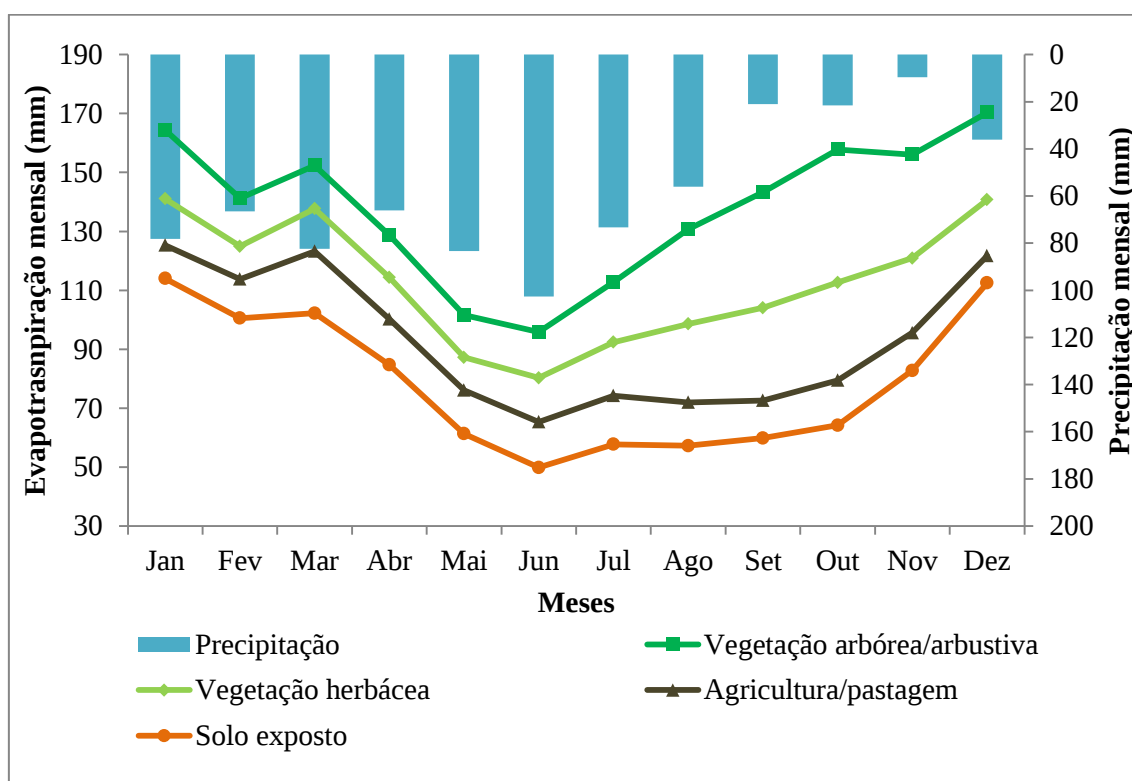


Figura 24. Comportamento da ET mensal ao longo do ano para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo da BHRI no período de 2005 a 2015.

Além de analisar o comportamento mensal da evapotranspiração da BHRI, foram calculados os totais anuais de ET para a bacia. A Figura 26 apresenta a espacialização dos valores anuais de ET para o período de 2005 a 2015. A ET anual para a bacia variou de 190 a 2200 mm. Observa-se que apenas nos anos de 2007, 2008 e 2012 que as áreas com ET anual superior a 1750mm apresentam maior representatividade. Além disso, a partir de 2013 houve um aumento gradativo das áreas da bacia com ET anual inferiores aos 750 mm.

A Figura 25 mostra a diminuição da ET média anual para a BHRI. Os resultados mostraram que no ano de 2008 foi registrada a maior ET anual média para o período analisado, 1462,16 mm/ano, 24% acima da média identificada para os 11 anos, que foi de 1177,59 mm/ano. Gradativamente esse valor foi diminuindo até o valor mínimo registrado no ano de 2015, onde a média da ET anual para a bacia foi de 831,22 mm/ano ficando 29% abaixo da média do período analisado. Entre os anos extremos, 2008 e 2015 foi identificada uma diminuição de 43% no valor médio da ET anual para a BHRI.

Observou-se na Figura 25 que nos anos de 2012 e 2013 foram registrados os valores mais baixos de precipitação anual (341,2 e 517,7 mm/ano, respectivamente). Esses valores obtidos estão abaixo da média histórica para essa região, que é de aproximadamente 630,10 mm/ano. Esse período de seca, somados as alterações ocorridas na distribuição dos tipos de uso e cobertura do solo, podem ser as principais causas da diminuição dos valores de ET anual identificada na bacia.

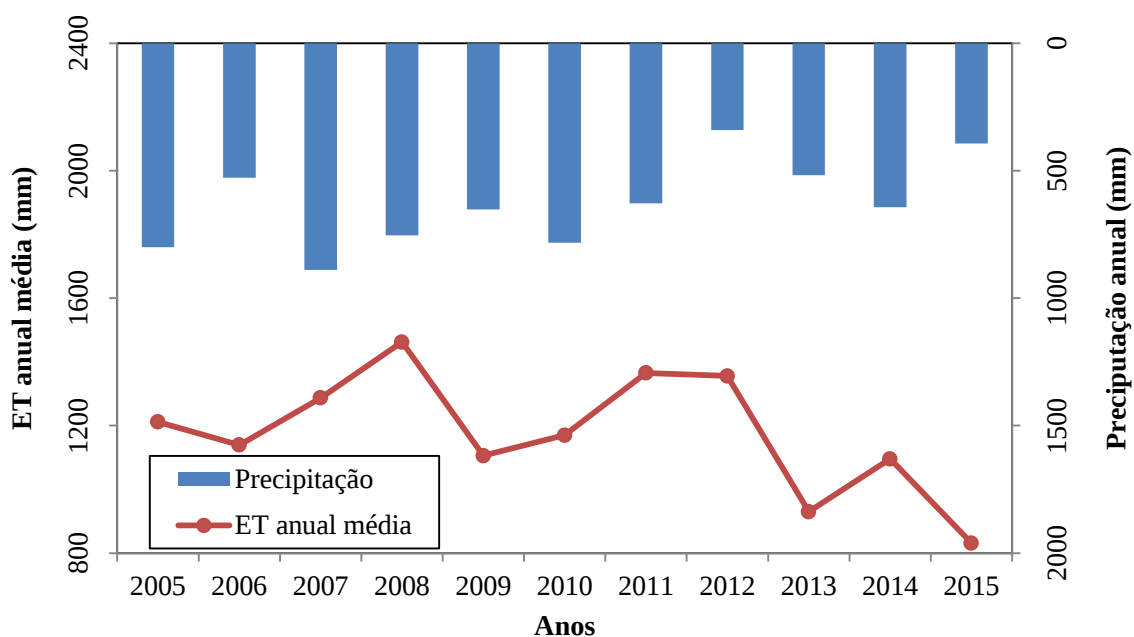


Figura 25. ET anual média e precipitação anual para a BHRI no período de 2005 a 2015.

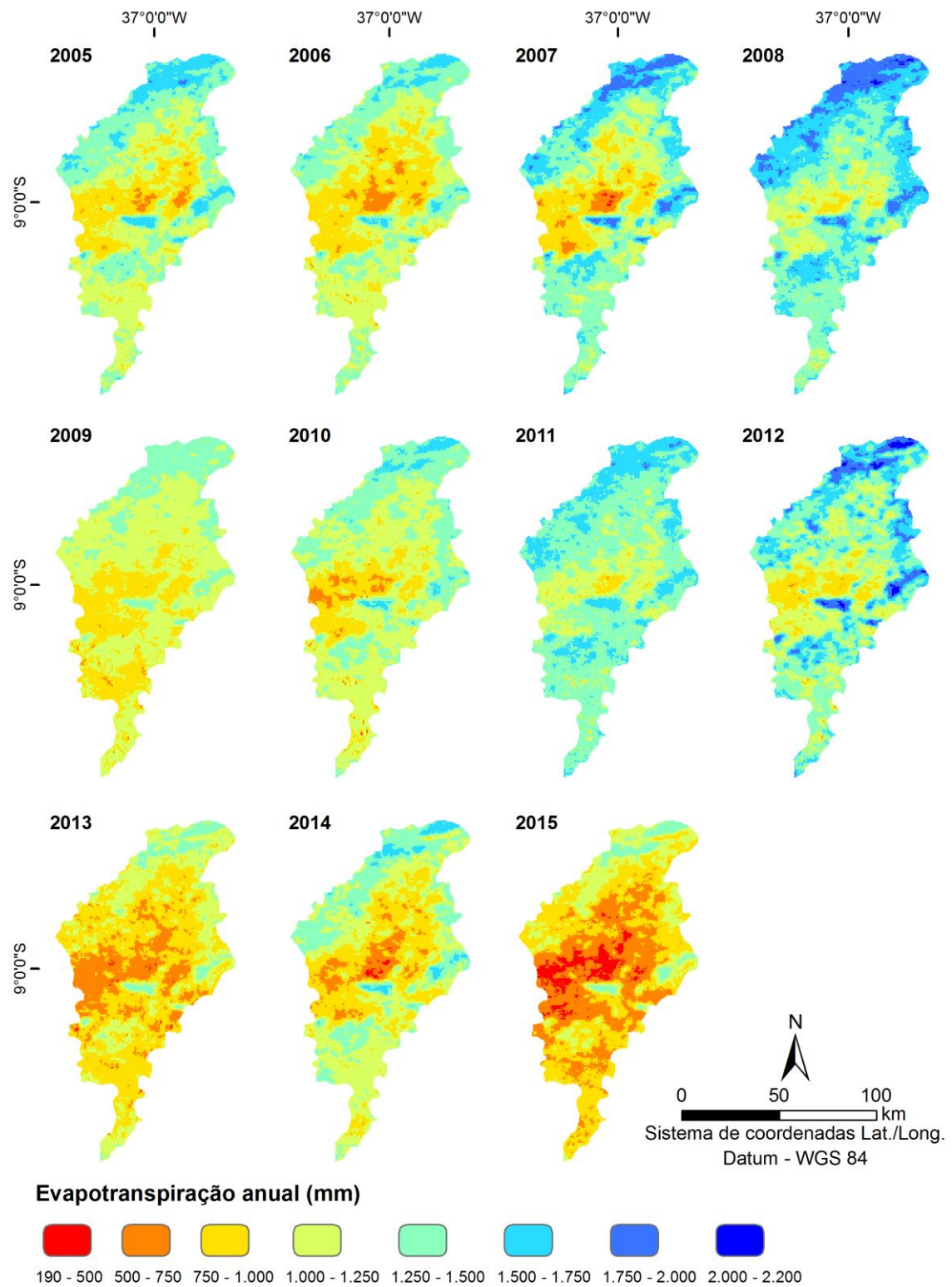


Figura 26. Distribuição da ET anual na BHRI para o período de 2005 a 2015.

Analisando a variação da ET anual a partir de cada uso e ocupação do solo, foi possível perceber que em todos os tipos de uso, a variação dos valores de ET anual foi de 12% a 19%. A Tabela 25 mostra que ao longo dos 11 anos analisados, nas áreas de solo exposto foi identificada uma variação de 19% nos valores de ET anual. Enquanto para as áreas de agricultura/pastagem a variação foi de 15%. Por fim, as classes que apresentaram as menores variações no período estudado foram a vegetação herbácea e a vegetação arbórea/arbustiva, com 13% e 12%, respectivamente.

Tabela 25. Estatísticas da ET anual para cada tipo de uso e cobertura do solo na BHRI

Tipos de uso	Mínimo (mm/ano)	Máximo (mm/ano)	Média (mm/ano)	DP * (mm/ano)	Coeficiente de variação
Agricultura/pastagem	590,10	1548,17	976,80	150,62	15%
Solo exposto	591,46	1648,46	828,48	154,14	19%
Vegetação Arbórea/arbustiva	784,61	1748,31	1439,61	170,84	12%
Vegetação herbácea	694,43	1646,40	1180,92	151,28	13%

*Desvio padrão

Para que haja uma análise conclusiva sobre as potenciais causas da diminuição dos valores de ET anual identificada na BHRI, seria necessária uma análise mais completa de outros parâmetros biofísicos, como: fluxo de calor sensível e latente, fluxo de calor no solo, etc. Além disso, deve-se ter uma boa base de dados coletados em campo, que forneçam uma série consistente de radiação solar incidente, saldo de radiação, etc.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do SEBAL para uma quantidade significativa de imagens sempre foi um dos principais problemas enfrentados, tendo em vista que há necessidade da execução de diversas etapas. Dessa forma, o desenvolvimento de um algoritmo para a automatização do SEBAL, apresentado no presente trabalho, mostrou-se ser uma ferramenta imprescindível para aplicações com um grande número de imagens.

Os resultados obtidos com a utilização do algoritmo de automatização do SEBAL foram bem próximos quando comparados com os obtidos por um especialista. Apesar de ainda ser uma primeira versão e de modificações serem necessárias para a melhoria de seu desempenho, os resultados são animadores

Com a aplicação do SEBAL automatizado, foi possível gerar uma base de dados para a BHRI oriunda de 282 imagens, o que seria inviável se o procedimento manual fosse aplicado a cada uma delas. A utilização de um número significativo de imagens faz com que a série de resultados seja mais consistente, melhorando assim as análises dos resultados.

Com base nos resultados obtidos, pôde-se verificar que o comportamento intranual da ET mensal está intimamente relacionado com o regime pluviométrico da bacia, além disso, cada tipo de uso e cobertura do solo apresenta características próprias de variação ao longo do ano. Verificou-se também que no período de 2005 a 2015, a evapotranspiração anual média apresentou uma diminuição dos valores, estando relacionados principalmente às modificações ocorridas nos tipos de uso e ocupação do solo e dos totais pluviométricos anuais.

Por fim, os resultados obtidos no presente trabalho foram satisfatórios e passam a fornecer importantes informações sobre as características biofísicas da BHRI, que até então eram escassas.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome, 297p., 1998.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSSEN, W. **SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land**, Idaho implementation. Idaho: Waters Consulting; University of Idaho: WaterWatch, Inc. 2002. 97 p. (Advanced Training and Users Manual, version 1.0).

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 133, p. 380-394, 2007

ANDRADE, R. G. Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ANDRADE, R. G.; BATISTELA, M.; BARBOSA, A. B.; SEDIYAMA, G.C.; DELGADO, R.C.; LIMA, E.P. **Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa da biomassa vegetal de pastagem no Mato Grosso do Sul**. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte – MG, 2009.

ANDRADE, R. G.; TEXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; NOGUEIRA, S. F.; SILVA, G. B. S.; VICTORIA, D. C.; FACCO, A. G. **Estimativa da evapotranspiração e da biomassa de pastagem utilizando o algoritmo SAFER e imagens MODIS**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa - PB. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015. v. 17. p. 3664-3670.

ARAÚJO, A. L. **Operacionalização do balanço de energia e evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

BAPTISTA, N. Q.; CAMPOS, C.H. **Caracterização do semiárido brasileiro**. In: CONTI, I. L.; SCHROEDER, E.; MEDAGLIA, V.R. (Org) Construindo saberes, cisternas e cidadania. Brasília: ed. IABS, 2014. p.45-47.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1995. 273p. PhD Dissertation

_____, PELGRUM, H.; WANG, J.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, n.2, p. 213-229, 1998

_____. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

_____, ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v.94, p. 321 – 340, 2003.

_____, CHANDRAPALA, L. Water balance variability accross Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, n.2, p.171-192, 2003.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SHIMABUKURO, Y.E.; SELIGER, R.; EVA, H.D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**. v..58, p. 116-127., 2015.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. N. A.; SILVA, B.B.; LOPES, P. M. O.; SILVA. E. F.F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 18, n.1, p. 73-84, 2014.

BORGES, C.K. **Obtenção da evapotranspiração real diária através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no semiárido brasileiro**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande –PB, 2013.

BRAGA, A. C. **Evapotranspiração e produtividade primária bruta em áreas agrícolas utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

BRASIL. Ministério de Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. **Nova delimitação do Semi-Árido brasileiro**, 2005.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. **Uso do NDVI para a determinação da biomassa na chapada do Araripe**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007. v. 8. p.71-85.

CABRAL, L. O. Revisitando as noções de espaço, lugar, paisagem e território, sob uma perspectiva geográfica. **Revista de Ciências Humanas**, v. 41, n. 1-2, p. 141-155, 2007.

COELHO, V. H. R. **Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

DU, J.; SONG, K.; WANG, Z.; ZHANG, B.; LIU, D. Evapotranspiration Estimation Based on MODIS Products and Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) Model in Sanjiang Plain, Northeast China **Chinese Geographical Science**, v. 23, n.1, p.73-91, 2013.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. R.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p. 74-88, 1995.

FRANCISCO, P. R. M. **Modelo de mapeamento da deterioração do bioma Caatinga da bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 18, n.8, p. 833-838, 2014.

KAZMIERCZAK, M. L.; SEABRA, F. B. **Índice de susceptibilidade de degradação ambiental [ISDA] em áreas do cerrado paulista**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007. v. 8. p. 2745-2752.

LOPES, J. G. As especificidades de análise do espaço, lugar, paisagens e território na Geografia. **Geografia Ensino & Pesquisa**. v. 16, n. 2, p.23-30, 2012.

MALVEZZI, R. **Semi-árido – uma visão holística**. Brasília: Confea, 2007. 140p.

MACHADO, C.C.C. **Alterações na superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil):Consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do Bioma Caatinga.** Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

MAHMOUD, S. H.; ALAZBA, A. A. A coupled remote sensing and surface energy balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. **Journal of Asian Earth Sciences.** v. 124, p. 269 – 283, 2016.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, p. 747-766, 1972.

MORSE, A.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; KRAMBER, W. J.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. **Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing:** Final Report, 220p., 2000.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers.** V.50. p. 885-900, 2007.

NASCIMENTO, D. M. **Estimativa do estoque de biomassa arbustivo arbórea por Sensoriamento Remoto em áreas de Caatinga em Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology.** V.77, p. 263-293, 1995.

OLIVEIRA, L. M. M. O. **Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na bacia do rio Tapacurá – PE.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 136p., 2012.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1039-1046, 2014.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 16-28, 2015.

OLIVEIRA, B. S.; MATAVELI, G. B. V. **Avaliação do desempenho dos classificadores Iseeg e Bhattacharya para o mapeamento de áreas de cana-de-açúcar no município de Barretos-SP**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013. v. 16. p. 089-096.

PEREIRA, L.C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 36 p.

ROSOLEM, N. P.; ARCHELA, R. S. **Geossistema, território e paisagem como método de análise geográfica**. In: VI seminário Latino-Americano de Geografia Física e II seminário Ibero-Americano de Geografia Física, Universidade de Coimbra, Portugal. 2010

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em Biomas tropicais**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M.; NETO, R. M. B. Estimation of evapotranspiration for diferente land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of Brígida River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Scienses**, v.74, p. 54-66, 2017.

SAMARASINGHE, G.B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 145-157, 2003.

SCHERER-WARREN, M. **Metodologia para a construção de séries temporais de evapotranspiração por técnicas de Sensoriamento Remoto**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, 2011.

SCHERER-WARREN, M; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.07, n.01, p. 65-82, 2014.

SILVA, B. B.; ARAÚJO, F. C.; MERCANTE, E.; VILAS BOAS, M. A.; WRUBLACK, S. C. **Estimativa da evapotranspiração real diária para a microbacia do Rio das Lontras utilizando o algoritmo SEBAL e imagens Landsat 8.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa - PB. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015. v. 17. p. 3903-3910.

SILVA, B.B.; GALVÍNCIO, J.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L; MACHADO, C.C.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MOURA M.S.B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SILVA, R. M. P.; LIMA, J. R.; MENDONÇA, I. F. C. Alteração da cobertura vegetal na sub-bacia do Rio Espinharas de 2000 a 2010. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n.2, p. 202-209, 2014.

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L. BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n.1, p. 3-8, 2016.

SILVA, A. M. **Análise da variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo e de parâmetros biofísico na bacia experimental de São João do Cariri - PB.** Monografia (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SILVA, L. P. V. **Automatização da seleção dos pixels âncoras no cálculo da equação de balanço de radiação na superfície do Algoritmo SEBAL.** Dissertação (Mestrado em Informática), Universidade Federal de Brasília, 2013.

SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILANS, A.M.B.P.; SILVA, F.M. Fluxo de calor sensível e evapotranspiração na Caatinga: Estudo Experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 177-188, 2007.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n.1, p. 185-206, 2008.

SOUZA, B. C. **Diversidade, biomassa aérea e estimativa do estoque de carbono em plantas da caatinga em um remanescente serrano no trópico semi-árido.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Universidade Estadual da Paraíba, 2009.

STEELE, D. D.; THORESON, B. P.; HOPKINS, D. G.; CLARK, B. A.; GAUTAM, R. Spatial mapping of evapotranspiration over Delvils Lake basin with SEBAL: application to flood mitigation via irrigation of agricultural crops. **Irrigation Science.** v. 33, p. 15 – 29, 2015.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing.** v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological satations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Org). Remote Sensing and Hydrology, v. 352, p. 154-157, 2012.

TEIXEIRA, A. H. De C.; SCHERER-WARREN, M.; LOPES, H. L.; HERNADEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; NEALE, C. M. U. **Application of MODIS images for modelling the energy balance componentes in the semi-arid conditions of Brazil.** In: Proceedings Of Spie – The International Society For Optical Engineering, 2013.

TRETIN, A. B. **Modelos para a estimativa de biomassa em área de eucalipto no sudeste do estado do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using Modis and Landsat Imagery with the METRIC Model. **Remote Sensing.** v. 5, p. 5397-5423, 2013.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (Org) **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Editora da UFRS, 2014. Cap. 7, p.253-288.

UDA, P.K.; CORSEUIL, C.W.; KOBİYAMA, M. Mapeamento do saldo de radiação da Bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v. 18, n.2, p. 249-258, 2013.